

На этих установках проведены первые циклы стендовых испытаний.

В гироконе непрерывного генерирования [13] (рис. 5) получен электронный пучок мощностью более 1000 кВт, развернутый (с частотой 181 МГц) и пропущенный через расстроенный выходной резонатор. Энергия электронов в этом эксперименте равна 220 кэВ. Электронный пучок мощностью 700 кВт (с энергией электронов 210 кэВ) возбуждал выходной резонатор гирокона, причем в непрерывном режиме ВЧ-мощность составляла 500 кВт. Цель испытаний — отработка электронно-оптического тракта гирокона. Токооседание в этих экспериментах не превышало 1%.

Импульсный гироколон [14] (рис. 6) на частоте 430 МГц развивал мощность 40 МВт в импульсе, длительность которого между точками половинной мощности составляла 6 мкс при частоте повторения 0,5 Гц (энергия электронов 1300 кэВ). Достигнутый коэффициент усиления составлял 23 дб. Цель испытаний — отработка схемы получения позитронов с помощью линейного ускорителя, питаемого гироконом.

Результаты, полученные ранее при испытании импульсной модели гирокона, где был измерен электронный КПД выше 90%, и приведенные экспериментальные данные подтверждают правильность наших представлений о возможностях гирокона. Они показывают, что

новый источник СВЧ-колебаний сможет найти применение в ускорительной технике и СВЧ-энергетике, особенно в тех ее областях, где требуется высокая мощность в единице оборота при минимальных потерях.

Поступила в Редакцию 25/XII 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Budker G. e.a. Patent US № 3.885.493, May 1975. Budker G. e.a. Patent UK № 1433236, Aug. 1976. Budker G. e.a. Schweiz. Patent № 562533, May 1975.
2. Карлинер М. М. и др. Устройство для получения круговой развертки пучка заряженных частиц. Авт. свид. № 471847, 1975.
3. Whall A., Pickin J. Patent UK № 954840, Jun. 1964.
4. Kaufman I. Patent US № 3.219.873, Nov. 1965.
5. Harfley P. Patent US № 2.381.539, Oct. 1945.
6. McRae I. Patent US № 2.408.437, Oct. 1946.
7. Konrad G. «IEEE Trans. Nuclear Sci.», 1975, v. NS-22, N 3, p. 1249.
8. Мощные электровакуумные приборы СВЧ. Под ред. Л. Клемшита. М., «Мир», 1974, с. 50, 126.
9. Мешков И. Н., Чириков Б. В. ЖТФ, 1965, т. XXXV, вып. 2, с. 2202.
10. Клеен В. Введение в электронику СВЧ. М., «Сов. радио», 1963, с. 443.
11. Budker G. e.a. Patent US № 4.019.088, Apr. 1977.
12. Карлинер М. М. и др. Гироколон. Авт. свид. № 503444, 1975.
13. Будкер Г. И. В кн.: Труды V Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., «Наука», 1977, т. 1, с. 284.
14. Будкер Г. И. и др. Там же, с. 280.

УДК 621.384.6

Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР

для народного хозяйства

АУСЛЕНДЕР В. Л.; САЛИМОВ Р. А.

Работы по созданию электронных ускорителей для народнохозяйственных целей были начаты в Институте ядерной физики по инициативе Г. И. Будкера [1] и до последнего времени проводились под его непосредственным руководством. В полной мере эти работы были развернуты с 1966 г. К концу 1977 г. Институтом изготовлено и поставлено различным организациям и предприятиям страны более 45 ускорителей.

Электронные ускорители используются для многих радиационно-химических процессов, в частности для облучения изоляции из полиэтилена, получения термоусаживающихся изделий, дезинсекции зерна и др. При облучении электронным пучком с энергией до 2 МэВ не

образуются никакие радиоактивные изотопы, а мощность дозы на много порядков превосходит радиоизотопные источники радиации. Электронный ускоритель с током 1 мА примерно эквивалентен радиоактивному источнику мощностью 10^5 Ки. Отсутствие остаточной активности, большая мощность дозы, сравнительная конструктивная простота биологической защиты позволяют широко использовать электронные ускорители непосредственно в технологических процессах и при достаточно большом выпуске продукции. Например, при дозе облучения 1 Мрад и 60%-ном использовании электронного пучка (одностороннее облучение листовых материалов или жидкости) ускоритель с мощностью

выпущенного пучка 20 кВт обеспечивает производительность 4 т/ч.

Применяя различные системы вывода пучка из ускорителя в атмосферу, можно создавать поля облучения различной конфигурации, наиболее рациональной для заданного процесса. В настоящее время в СССР разработано и изготавливается несколько типов электронных ускорителей [2, 3] для использования их в радиационных процессах. Однако энергия электронов этих ускорителей не превышает 1 МэВ, а мощность большинства из них на один облучатель не превышает 10 кВт, что значительно сужает возможную область их применения.

В этой работе приведены обзор работ Института ядерной физики по разработке и созданию электронных ускорителей для народнохозяйственных целей, а также данные об основных направлениях их использования.

В Институте создано два типа ускорителей ЭЛВ и ИЛУ* со средней мощностью в несколько десятков киловатт в диапазоне энергий от 400 до 2000 кэВ, предназначенных непосредственно для использования в технических процессах на производстве. Кроме них разработаны другие типы ускорителей ЭЛИТ и ЭСУ, используемые для других целей.

Ускоритель типа ИЛУ-6 — импульсный высокочастотный ускоритель, который применяется в народном хозяйстве в качестве мощного источника радиации.

Основой ускорителя является тороидальный резонатор, работающий на частоте 100—127 МГц. Непосредственно на резонаторе размещен высокочастотный генератор с самовозбуждением, собранный по схеме с общей сеткой. Ускоряющий зазор, определяющий рабочую частоту резонатора и предельную энергию, может меняться от 10 до 20 см. При значении ускоряющего зазора 20 см резонатор имеет следующие параметры: резонансная частота 127,5 МГц, добротность $2 \cdot 10^4$, шунтовое сопротивление $4 \cdot 10^6$ Ом. Резонатор помещен внутри стального вакуумного бака. Откачка вакуумного объема проводится 4 магнитоэлектрическими насосами типа НОРД-250. Все основные вакуумные

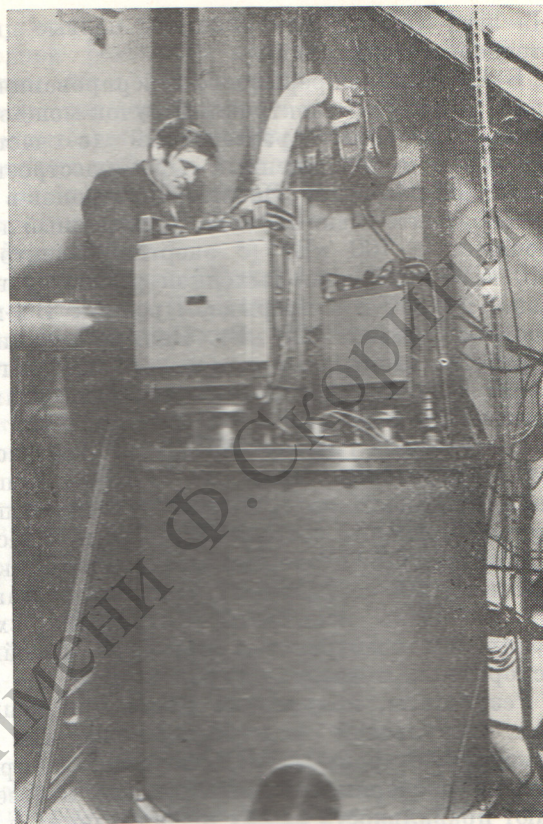


Рис. 1. Общий вид ускорителя ИЛУ-6

уплотнения выполняем на индии. Рабочий вакуум 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.

Электронная пушка установлена непосредственно на ускоряющем зазоре резонатора и отделена от него сеткой. Это позволяет, подавая смещение на катод, регулировать ток ускоренных электронов. Установку катода непосредственно в зазоре нельзя использовать, так как электроны, входящие в ускоряющий зазор после некоторой фазы ускоряющей полуволны высокочастотного напряжения, не успевают пролететь зазор, возвращаются обратно и могут привести к быстрому разрушению катода. В связи с этим при понижении ускоряющего напряжения трудно сохранить постоянную мощность в электронном пучке. Для сохранения постоянной мощности во всем возможном диапазоне энергий ускоренного электронного пучка (0,4—2 МэВ), с одной стороны, предусмотрена возможность увеличения частоты следования импульсов с 50 до 300 Гц при сохранении средней мощности питания генераторной лампы, с другой — уменьшение ускоряющего зазора с 20 до 7—

* В разработке ускорителей ИЛУ принимали участие В. Л. Ауслендер, Г. Б. Глаголев, Г. И. Кузнецов, Н. А. Лившиц, Р. М. Лапик, В. А. Поляков, А. Д. Панфилов, А. А. Тувик, В. Г. Чесноков, И. Л. Черток; типа ЭЛВ — А. А. Авдченко, В. А. Гапонов, Б. М. Коробельников, Г. С. Крайнов, С. А. Кузнецов, Н. К. Куксанов, В. И. Кондратьев, Р. А. Салимов, В. Г. Черепков, А. И. Шарапа.

10 см. Оба эти метода позволяют использовать одну и ту же конструкцию ускорителя для получения одинаковой средней мощности в достаточно широком энергетическом интервале.

Сразу после анодного отверстия установлена короткая магнитная линза, позволяющая оперативно корректировать поперечный размер пучка на входе в систему выпуска и на выпускных фольгах.

Ускоритель ИЛУ-6 представляет собой довольно компактную установку (рис. 1), его основные параметры приведены ниже.

| | |
|--|----------|
| Диапазон энергий ускоренных электронов, кэВ | 400—2000 |
| Мощность пучка электронов во всем диапазоне энергий, кВт | 20 |
| (в отдельных режимах 30—35 кВт) | |
| Разброс энергий в пучке, % | ± 10 |
| Длительность импульса, мкс | до 700 |
| Частота повторения импульсов, Гц | до 300 |
| Питание установки — промышленная сеть, В | 3 × 380 |
| Потребляемая мощность, кВт | до 100 |

Ускорители типа ЭЛВ [4], в которых генератором ускоряющего напряжения является секционированный выпрямитель, начали разрабатываться в Институте в 1971 г. В 1974 году был принят Межведомственной комиссией ускоритель ЭЛВ-1, а в 1975 — ЭЛВ-2. Оба они успешно прошли испытания на надежность по несколько тысяч часов и рекомендованы к промышленному применению. Принцип действия и конструкция ускорителя ЭЛВ-1 достаточно подробно описаны в [4], в настоящей работе изложено лишь различие его последующих модификаций. Ниже приведены параметры этих ускорителей.

| | ЭЛВ-1 | ЭЛВ-2 | ЭЛВ-3 | ЭЛВ-4 |
|--|----------|----------|---------|----------|
| Диапазон энергий ускоренных электронов, кэВ | 400—1000 | 800—1500 | 400—700 | 800—1500 |
| Мощность пучка электронов во всем диапазоне энергий, кВт | 20 | 20 | 50 | 40 |
| Пulsация ускоряющего напряжения под нагрузкой, % | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Суммарные потери в ускорителе, кВт (при максимальной мощности) | 3,5 | 4 | 5 | 5 |
| Размеры ускорителя без выпускного устройства, м: | | | | |
| высота | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| ширина | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |

Повышение энергии ускорителя ЭЛВ-2 по сравнению с ЭЛВ-1 достигается увеличением числа

выпрямительных секций с 24 до 37 и удлинением ускорительной трубки с 1200 до 1500 мм. Мощность пучка этих первых двух модификаций ограничивалась как величиной допустимых пульсаций на фильтрующих конденсаторах выпрямительных секций (ограничение по выпрямленному току), так и нагрузочными характеристиками

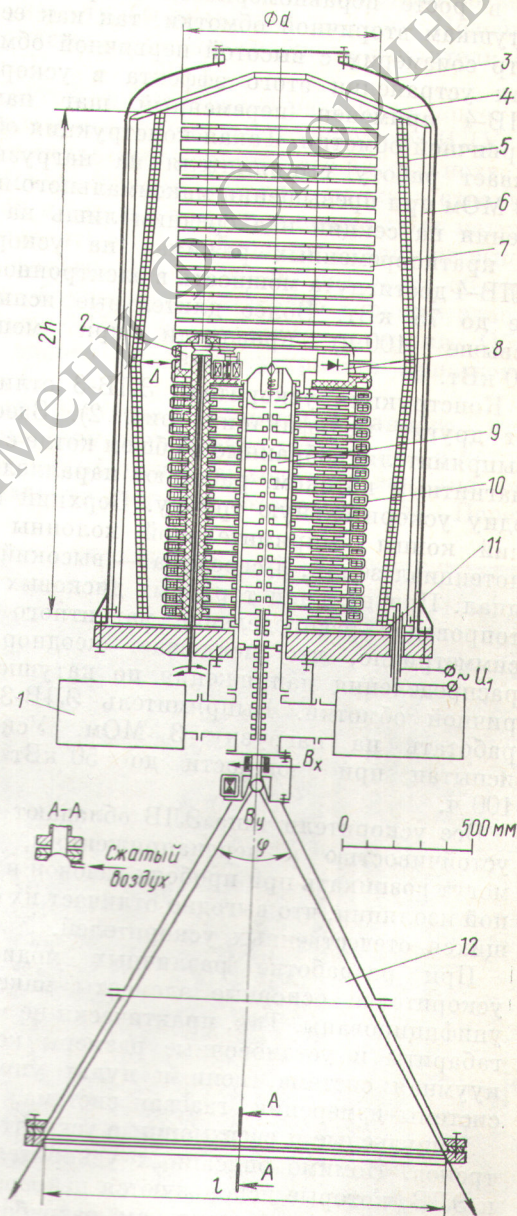


Рис. 2. Конструкция ускорителя ЭЛВ-3: 1 — вакуумный насос; 2 — высоковольтный электрод; 3 — котел; 4 — конический магнитопровод; 5 — первичная обмотка; 6 — цилиндрический магнитопровод; 7, 10 — выпрямительные секции; 8 — блок управления; 9 — ускорительная трубка; 11 — дисковый магнитопровод; 12 — выпускное устройство

ками высоковольтного трансформатора. Опыт последующей работы показал, что, не выходя за габариты существующей конструкции, возможно увеличение вдвое емкости фильтрующих конденсаторов в каждой выпрямительной секции. Ограничения по мощности, связанные с высоковольтным трансформатором, проявляются в росте неравномерности напряжения по катушкам вторичной обмотки, так как ее диаметр соизмерим с высотой первичной обмотки. Для устранения этого эффекта в ускорителе ЭЛВ-4 применен переменный шаг намотки первичной обмотки. Такая конструкция обеспечивает работу выпрямителя на нагрузку до 20 МОм при превышении максимального напряжения на секции над средним лишь на 10%. В кратковременных режимах на ускорителе ЭЛВ-4 достигнута мощность в электронном пучке до 75 кВт. Более длительные испытания (свыше 100 ч) проводили при мощности 40 кВт.

Конструкция ускорителя ЭЛВ-3 отличается от других модификаций (рис. 2). Здесь два выпрямителя, собранные в общем котле с общим магнитным потоком, работают параллельно на одну ускорительную трубку. Верхний и нижний концы выпрямительной колонны имеют потенциал земли, а середина — высокий потенциал. При наличии торцовых дисковых магнитопроводов распределение магнитного потока симметрично, что исключает неоднородность распределения напряжения по катушкам вторичной обмотки. Выпрямитель ЭЛВ-3 может работать на нагрузку 3 МОм. Ускоритель испытан при мощности до 50 кВт свыше 100 ч.

Все ускорители типа ЭЛВ обладают высокой устойчивостью к перенапряжениям, которые могут возникать при пробоях газовой и вакуумной изоляции, что выгодно отличает их от имеющихся отечественных ускорителей.

При разработке различных модификаций ускорителей основные элементы максимально унифицированы. Так, практически не меняются габариты и установочные размеры котла, вакуумная система, цепи и пульт управления, системы измерения, газовая система.

Импульсные и сверхмощные ускорители электронов. Помимо описанных ускорителей ИЛУ и ЭЛВ, которые используются непосредственно в производстве, Институтом разработаны импульсные типа ЭЛИТ [6] и сверхмощные типа ЭСУ [7] ускорители электронов.

Ниже приведены параметры ускорителей типа ЭЛИТ.

ЭЛИТ-0,8А ЭЛИТ-1В ЭЛИТ-2

| | | | |
|--|--------|--------|--------|
| Средняя энергия электронов в импульсе, МэВ | 0,8 | 1,1 | 1,5 |
| Средняя мощность пучка, кВт | 0,8 | 4,5 | 10 |
| Разброс энергий в пучке, % | 10 | 10 | 15 |
| Длительность импульса, мкс | 1 | 2,5 | 3,5 |
| Импульсная мощность, МВт | 8 | 20 | 30 |
| Размеры окна при выпуске электронов через фольгу, мм | 153×35 | 420×65 | 420×65 |
| Питание установки — выпрямитель, кВ | 20 | 10 | 10 |
| Потребляемая мощность от сети, кВт | 3 | 20 | 40 |
| Размеры ускорителя без выпускного устройства, м: | | | |
| высота | 0,76 | 1,15 | 1,92 |
| диаметр | 0,4 | 1,0 | 1,0 |

Для ускорителя ЭЛИТ-2 разработано устройство вывода концентрированного пучка в атмосферу. В настоящее время устройство находится в стадии наладки.

Ускорители ЭСУ проектировались для работы в мегаваттном диапазоне мощностей. Ниже приведены проектные параметры ускорителя ЭСУ-2.

| | |
|---|-------------|
| Диапазон энергий ускоренных электронов, кэВ | 30—500 |
| Электронный ток, А | до 10 |
| Пульсация ускоряющего напряжения, % | ± 2,5 |
| Режим работы | непрерывный |
| Размеры выпрямителя, м: | |
| высота | 3,5 |
| диаметр | 2 |
| Габариты ускорительной трубки с блоком питания и управления, м: | |
| высота | 4 |
| диаметр | 1,2 |

Ускоритель ЭСУ-1 может работать лишь короткими промежутками. При работе на вакуумную мишень в 10-секундном режиме достигнута мощность 1100 кВт при энергии 250 кэВ. На этом же ускорителе осуществлен выпуск в воздух концентрированного пучка мощностью 400 кВт [8].

Ускоритель ЭСУ-2 используется в настоящее время для питания высокочастотного генератора — гирокона [9]. Здесь также получена мощность 1000 кВт, но уже в непрерывном режиме.

Устройство выпуска пучка в атмосферу. Ускорители ИЛУ и ЭЛВ снабжаются различными устройствами для выпуска электронного пучка

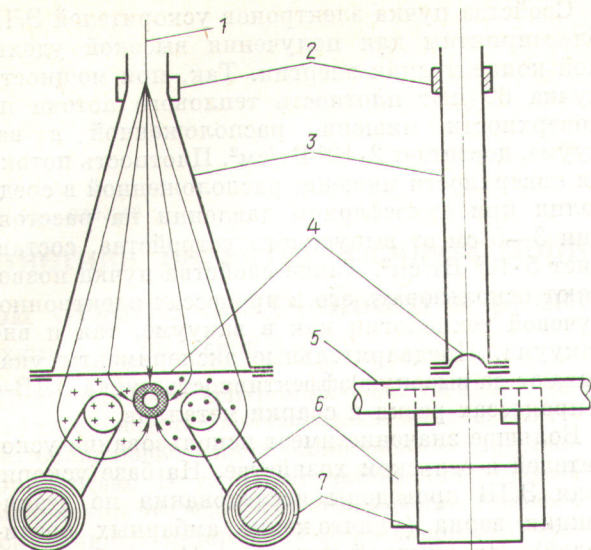


Рис. 3. Устройство для всестороннего облучения изделий, имеющих цилиндрическую форму:

1 — пучок; 2 — развертка; 3 — растроб; 4 — фольга; 5 — облучаемый объект; 6 — магнитопровод; 7 — обмотка

в атмосферу. Наиболее простое устройство — это выпуск линейно развернутого пучка через титановую фольгу, охлаждаемую воздухом. При таком способе удается выпускать до $0,15 \text{ mA/cm}^2$. Срок службы фольги превышает 1000 ч. Стандартный размер выпускного окна $75 \times 980 \text{ мм}^2$ позволяет выпускать ток до 80 мА. Угол отклонения пучка 30° . В ускорителе ИЛУ каждый импульс тока равномерно распределяется по фольге. На ускорителях ЭЛВ применяется пилообразная развертка пучка вдоль и поперек выпускного окна. Частота сканирования поперек окна 1075 Гц, а вдоль окна используется обычно 50 Гц, но в тех случаях, когда это специально требуется, ее можно поднять до 400 Гц. Неравномерность дозы вдоль окна, получаемой изделием, перемещающимся поперек окна не хуже $\pm 10\%$. При прохождении через фольгу электроны с энергией 500 кэВ рассеиваются в ней на угол примерно 45° , который убывает линейно с ростом энергии электронов.

Для облучения изделий, имеющих цилиндрическую форму (трубы, шланги), разработаны два типа устройств с кольцевой разверткой пучка. Устройство первого типа показано на рис. 3. Здесь пучок, выпущенный в воздух через стандартное выпускное устройство, заворачивается постоянными магнитами на цилиндрическое изделие. Устройство проверяли при энергии электронов от 800 до 1500 кэВ на ускорителе

ЭЛВ-2. Доля тока, попадающая на изделие, составляет 70% для трубы диаметром 6 см и 50% для диаметра 4 см, равномерность тока по азимуту трубы не хуже $\pm 10\%$. На этом же устройстве облучали три трубы диаметром 2 см одновременно. Ток, попадающий на них, составляет 50% тока ускорителя. Равномерность также не хуже $\pm 10\%$. Такая система позволяет облучать трубы диаметром до 15 см. Подобными устройствами можно снабжать усилители ИЛУ и ЭЛВ.

Другой тип кольцевой развертки может быть использован лишь на ускорителе ИЛУ, так как импульсный характер его работы позволяет отклонять каждый импульс пучка в отдельный канал и затем с помощью поворотных магнитов направлять его с необходимым углом на выпускные фольги. Это позволяет создавать объемные поля облучения с достаточно хорошей однородностью $\pm 15\%$ и меньшими потерями. Общий вид одного из таких устройств приведен на рис. 4.

Для выпуска концентрированного пучка в атмосферу разработано устройство, в котором электронный пучок выходит из вакуума через систему из четырех отверстий [5]. Перепад

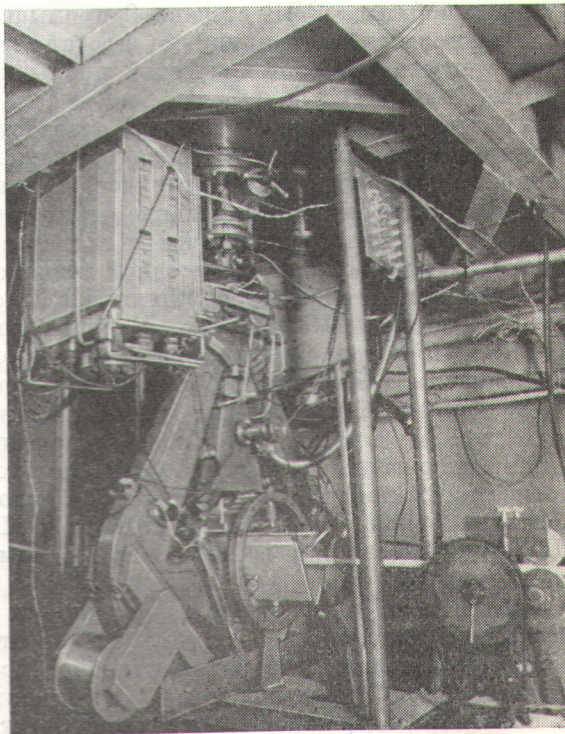


Рис. 4. Общий вид выпускного устройства ускорителя типа ИЛУ

давления от атмосферного до 10^{-6} мм рт. ст. в ускорительной трубке обеспечивается пятью ступенями откачки, из которых последняя ступень — это магниторазрядные насосы — принадлежность ускорителя при любом способе выпуска пучка. Параметры пучка ЭЛВ таковы, что при расходимости $5 \cdot 10^{-2}$ рад через отверстие диаметром 1 мм проходит 20 кВт. Пучок мощностью 75 кВт проходит через отверстие размером около 1,5 мм. Полная мощность, которая выделяется на всех диафрагмах, не превышает 3 кВт.

Использование ускорителей в народном хозяйстве. В настоящее время уже создан целый ряд радиационных технологических процессов на основе ускорителей Института ядерной физики СО АН СССР. Наиболее широко используется облучение изделий из полиэтилена. Радиационно-сшитые изделия из полиэтилена обладают повышенной химической стойкостью, механической прочностью и термостойкостью, что позволяет обеспечить длительную работоспособность изделий (трубы, провода с полиэтиленовой изоляцией и т. п.) при 135 и кратковременный нагрев до 250 °С.

Для производства проводов и кабелей с термостойкой полиэтиленовой изоляцией на базе ускорителей типа ЭЛВ создано 9 промышленных технологических линий на предприятиях Министерства электротехнической промышленности.

На базе ускорителя типа ИЛУ разработана установка для производства полиэтиленовых термостойких труб для систем горячего водоснабжения. В этом случае применение одной тонны этих труб экономит пять тонн металлических труб. Экономический эффект одной технологической линии на основе ускорителя ИЛУ составит по данным НИФХИ им. Карпова более 1 млн. руб. в год. Следует отметить еще одну возможность, связанную с облучением, — получение высокотемпературных термоусаживаемых труб и шлангов на основе полиэтилена и фторсодержащих полимеров. Создание технологических линий для этих процессов с использованием ускорителей ИЛУ-6 ведется в НПО «Пластик» (Москва) и в НПО «Пластполимер» (Ленинград).

Кроме того, проектируются установки по получению регенерата бутылкаучука из отработанных изделий и по радиационной очистке сточных вод промышленных предприятий с большим содержанием поверхностно-активных веществ.

Свойства пучка электронов ускорителей ЭЛВ благоприятны для получения высокой удельной концентрации энергии. Так, при мощности пучка 60 кВт плотность теплового потока на поверхности мишени, расположенной в вакууме, достигает $2 \cdot 10^6$ Вт/см². Плотность потока на поверхности мишени, расположенной в среде гелия при атмосферном давлении на расстоянии 3—5 см от выпускного устройства, составляет $5 \cdot 10^5$ Вт/см². Такие свойства пучка позволяют использовать его в процессах электронно-лучевой технологии как в вакууме, так и вне вакуума. Предварительные эксперименты указывают на высокую эффективность пучка ЭЛВ-4 в процессах резки и сварки металлов.

Большое значение имеет использование ускорителей в сельском хозяйстве. На базе ускорителя ЭЛВ проведены исследования по дезинсекции зерна (уничтожение амбарных вредителей). На опытной установке Новосибирского филиала ВНИИзерно было облучено около 1200 т зерна. Эти испытания дали положительные результаты, на их основе в 1978 г. будет создана опытно-промышленная установка производительностью 200 т/ч.

В связи со строительством крупных свиноводческих комплексов (100 и более тысяч голов одновременного содержания) возникают проблемы обеззараживания сточных вод. В 1978 г. будет создана на базе ускорителя ИЛУ-6 опытно-промышленная установка для радиационного обеззараживания этих сточных вод производительностью 1—2 тыс. м³ в сутки.

Поступила в Редакцию 16/1 1978 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г. И. В кн.: Труды II Всесоюз. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л., изд. НИИЭФА, 1976, т. 1, с. 48.
2. Гусев О. А. Там же, т. 1, с. 3.
3. Мури́н Б. П. и др. Там же, т. 1, с. 265.
4. Будкер Г. И. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 3, с. 216.
5. Будкер Г. И. и др. В кн.: Материалы Всесоюз. конф. по разработке и практическому применению электронных ускорителей. Томск, 1975, с. 188.
6. Вассерман С. Б. и др. Труды IV Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., «Наука», 1974.
7. Гапонов В. А. и др. [5], с. 131.
8. Иевлев В. М. и др. «Изв. АН СССР СО. Сер. техн.», 1977, № 13, вып. 3, с. 52.
9. Будкер Г. И. и др. В кн.: Труды V Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., «Наука», 1977, т. 1, с. 284.