

К 60-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СО РАН

Ускорители электронов для промышленного применения,
разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

А.А. Брызгин, Н.К. Куксанов, Р.А. Салимов

В начале 1960-х годов в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) по инициативе его основателя и директора Г.И. Будкера были начаты работы по созданию мощных ускорителей электронов для применения в народном хозяйстве. Описаны принцип действия и устройство основных систем мощных промышленных ускорителей электронов серий ЭЛВ и ИЛУ, разработанных и производимых Институтом ядерной физики. Всего начиная с 1972 г. ИЯФ СО РАН произвёл и поставил в разные страны 170 ускорителей ЭЛВ и более 50 ускорителей ИЛУ, большинство из которых и сейчас находится в эксплуатации. В обзорах Международного агентства по атомной энергии ИЯФ СО РАН назван как одна из немногих организаций в мире, которые завоевали доверие промышленности как поставщики надёжных промышленных ускорителей.

Ключевые слова: мощные промышленные ускорители электронов, ускоритель прямого действия, линейный высокочастотный ускоритель, ускорительная трубка, высокочастотный резонатор, устройство выпуска пучка, электронный пучок, электронно-лучевая обработка, тормозное излучение, конвертор для генерации тормозного излучения

PACS numbers: 07.77.Ka, 29.20.-c, 41.75.Fr

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>

Содержание

1. Введение (672).
 2. Основные области применения промышленных ускорителей электронов (673).
 3. История создания промышленных ускорителей электронов в ИЯФ (674).
 4. Конструкция ускорителей серии ЭЛВ (675).
 - 4.1. Высоковольтный выпрямитель.
 - 4.2. Ускорительная трубка.
 - 4.3. Устройства вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу.
 - 4.4. Система управления.
 5. Параметры и применение ускорителей серии ЭЛВ (677).
 6. Высокочастотные ускорители типа ИЛУ (679).
 - 6.1. Высокочастотный ускоритель ИЛУ-8.
 - 6.2. Высокочастотный ускоритель ИЛУ-10.
 - 6.3. Высокочастотные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14.
 7. Конверторы для генерации тормозного излучения (682).
 8. Ускорители ИЛУ в ИЯФ и работы по исследованию радиационных процессов (683).
 9. Заключение (684).
- Список литературы (684).

А.А. Брызгин, Н.К. Куксанов, Р.А. Салимов.
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск,
Российская Федерация
E-mail: A.A.Bryazgin@inp.nsk.su, kuksanov47@mail.ru,
R.A.Salimov@inp.nsk.su

Статья поступила 15 января 2018 г.,
после доработки 16 марта 2018 г.

1. Введение

В 1929 г. американским физиком Р. Ван де Граафом был разработан электростатический генератор на напряжении 80 кВ, позднее, в 1931 г., он создал более мощный генератор на напряжение 1 МВ, а в 1933 г. — на напряжение 7 МВ. На основе этих генераторов строились высоковольтные ускорители, в которых ускорение заряженных частиц происходило в вакуумированной ускорительной трубке, на верхний конец которой подавалось высокое напряжение.

В 1931 г. английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон из лаборатории Резерфорда разработали и построили каскадный генератор с выходным напряжением 700 кВ. В дальнейшем на основе этих высоковольтных генераторов были созданы ускорители, позволившие генерировать пучки ускоренных частиц с энергией 10^6 эВ (1 МэВ) и выше.

Линейный высокочастотный ускоритель заряженных частиц был создан и запатентован в 1928 г. работавшим в Германии норвежским физиком Рольфом Видерое [1].

Развитие ускорительной техники и изучение физики взаимодействия интенсивного электронного пучка с различными веществами привели к разработке процессов радиационной модификации материалов. Для внедрения этих процессов в промышленность в передовых странах стали разрабатывать мощные промышленные ускорители электронов [2].

В промышленных линейных высокочастотных ускорителях (называемых также линаками (от английского термина linac — linear accelerator)) электроны ускоряют-

ся высокочастотным электрическим полем до энергий 6–12 МэВ, при этом питающее напряжение высокочастотных генераторов обычно не превышает 30–35 кВ.

2. Основные области применения промышленных ускорителей электронов

В 1954 г. компания Ethycon (подразделение компании Johnson & Johnson) начала использовать мощные ускорители электронов для стерилизации медицинской продукции [2, 3].

В конце 1950-х годов английскими учёными под руководством А. Чарльсби был открыт и исследован процесс твердотельного сшивания молекул полиэтилена под действием ионизирующего излучения и было начато исследование свойств сшитого полиэтилена [4]. Установлено, что в сшитом полиэтилене формируется квазикристаллическая структура, благодаря чему он перестаёт вести себя как аморфное тело — при высокой степени сшивания он перестаёт плавиться и может сохранять форму при повышении температуры до высоких значений, до тех пор пока не обуглится.

Это открытие стимулировало развитие радиационной химии и привело к разработке и производству проводов и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, обладающих повышенной жаростойкостью. В результате исследований поведения полимерных соединений [5] было установлено, что в процессе облучения параллельно идут процессы радиационной деструкции и сшивания и конечная доза этих процессов определяет, будет ли происходить сшивание и до какой степени. При очень больших дозах облучения во всех полимерах превалируют процессы радиационной деструкции.

В 1960-е годы ускорители электронов стали использоваться для производства проводов и кабелей. Были разработаны составы, обеспечивающие сшивание под действием ионизирующих излучений, и началось расширение номенклатуры проводов и кабелей со сшитой изоляцией.

В процессе изучения свойств сшитых полимеров был обнаружен эффект памяти формы. Этот эффект был использован для разработки технологий производства термоусаживаемых трубок, манжет, плёнки и муфт для разделки мощных высоковольтных кабелей.

Существенный рост производства проводов и кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией привёл к увеличению спроса на мощные ускорители электронов и к возникновению потребности увеличения мощности пучка и энергии ускорителей. Промышленные ускорители сегодня являются основными источниками ионизирующего излучения в радиационных процессах [2, 6]. Изотопные источники (главным образом на основе изотопа ^{60}Co и в заметно меньшем объёме на основе ^{137}Cs) используются также для промышленной радиационной обработки [5]. Суммарные мощность и производительность изотопных источников в мире уступают мощности и производительности мирового парка ускорителей электронов. Согласно обзорам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) число мощных ускорителей электронов, осуществляющих коммерческую радиационную обработку, в мире превышает число коммерческих изотопных источников в 8–9 раз.

Основные преимущества изотопных источников — простота и надёжность и более скромное энергопотреб-

ление. Основные недостатки изотопных источников — существенно меньшая производительность, необходимость регулярной (и весьма дорогой) их перезарядки вследствие падения активности излучающих элементов и риск радиационных аварий в случае нештатных ситуаций, которые обычно возникают во время перезарядки, в процессе транспортировки активных элементов к источнику или месту переработки отработанных элементов. Простота самих изотопных источников нивелируется сложностью конвейера, транспортирующего обрабатываемые изделия, поскольку для полного использования гамма-излучения активных элементов, распределённых внутри источника почти изотропно, конвейер делается многоуровневым и многооборотным для организации многократного обхода активных элементов по спирали на каждом из горизонтальных уровней.

В последние десятилетия радиационная химия активно развивается. Использование ионизирующих излучений позволяет создавать более эффективные и экологически чистые технологии, а также уникальные технологии, не имеющие аналогов в химическом производстве. Электронный пучок не вносит в технологический процесс никаких загрязнений, энергия излучения поглощается в объёме материала и сначала переходит в возбуждение электронных оболочек атомов и молекул, а затем уже из этих возбуждённых состояний она может переходить в различные другие процессы, например в ионизацию, разрыв химических связей, испускание квантов электромагнитного излучения, передачу энергии другим атомам или молекулам, и только после развития этих процессов происходит термализация возбуждённых состояний.

Энергетическую эффективность радиационной обработки можно проиллюстрировать процессом радиационной стерилизации полимерных изделий. Стерилизационная доза для медицинских изделий лежит в интервале 15–25 кГрей (1 Грей = 1 Дж поглощённой энергии ионизирующего излучения на 1 кг массы облучаемого продукта). После поглощения дозы 25 кГр полимерные изделия нагреваются на 11–13 °С, процесс обработки происходит за несколько секунд. Термическая (автоклавная) стерилизация по медицинским нормам проводится при температурах 120–160 °С, длительность процесса — от нескольких десятков минут до двух часов. Поэтому радиационно-химические процессы при правильной организации должны быть более рентабельными.

Новые перспективные применения ускорителей электронов — это обработка сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, деконтаминация больничных отходов для последующей переработки, использование в производстве сверхчистых нанопорошков.

Расширяются также области применения изделий из вспененного полиэтилена и других полимеров, изготовленных с помощью электронно-лучевой обработки. Вначале эти материалы использовались в качестве упаковочных материалов, сейчас вспененные полимеры применяются для шумоизоляции автомобилей, тепло- и шумоизоляции в строительстве, в качестве компенсирующих прокладок в строительстве и дорожных работах, для изготовления туристских ковриков, детских игрушек и т.д.

Советский Союз был одним из мировых лидеров в исследовании радиационных процессов начиная с 1940-х

годов. Развитие атомной энергетики и атомной промышленности требовало сведений о радиационной стойкости различных веществ и материалов (конструкционных, электроизоляционных, смазочных и т.д.), а также данных о изменении их параметров в процессе набора дозы [7, 8]. Проводились обширные исследования воздействия больших доз облучения на различные углеводородные соединения, которые предлагалось использовать в качестве теплоносителей в активных зонах реакторов. Кроме того, важно было установить, как поведут себя электроизоляционные, уплотнительные и смазочные материалы в процессе облучения. Однако от идеи использования углеводородных соединений для охлаждения активных зон реакторов после проведения исследований отказались.

Исследования радиационных процессов в СССР до 1960-х годов проводились на ядерных реакторах и изотопных источниках. В разработке и использовании мощных ускорителей электронов наша страна сильно отставала от США и европейских стран — у нас было всего несколько ускорителей, тогда как только США произвели около 200 промышленных ускорителей типа "динамитрон". В начале 1960-х годов в СССР начали преодолевать отставание в разработке и производстве промышленных ускорителей электронов.

Ещё в 1940-е годы в СССР были начаты исследования влияния радиационной обработки на пищевые продукты. Было показано, что радиационная обработка позволяет уменьшить потери при хранении пищевых продуктов и при умеренных дозах не приводит к изменению их свойств. В последние десятилетия промышленная радиационная обработка пищевых продуктов в России не производилась, так как действовавшая нормативная база не охватывала процессы радиационной обработки пищевых продуктов. В настоящее время вводятся новые Государственные стандарты (ГОСТ), согласованные с международными стандартами по облучению пищевых продуктов. Это открыло возможности разработки и внедрения новых технологий облучения в сельское хозяйство и пищевую промышленность. Детально ситуация описана в [9].

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (Food and Agriculture Organization — FAO) Организации объединённых наций (ООН) потеря продуктов питания вследствие порчи достигает порядка трети от всего произведённого объёма, составляя 1,3 млрд тонн [8].

Внедрение процесса холодной пастеризации (электроно-лучевой обработки) позволит сократить потери пищевых продуктов, снизить заболеваемость населения и расширить рынки сбыта благодаря увеличению срока хранения готовой продукции.

3. История создания промышленных ускорителей электронов в ИЯФ

Работы по созданию ускорителей для применения в народном хозяйстве были начаты в Институте ядерной физики (ИЯФ) Сибирского отделения Академии наук СССР (ныне — ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН) в 1963 г. по инициативе его основателя и директора Г.И. Будкера. Ниже приведены его слова.

"До сих пор ускорители, как правило, делались для исследовательских целей — для изучения строения мате-

рии. Однако в проникающей радиации таятся большие практические возможности.

Свойство частиц преодолевать любые преграды, достигающие иногда нескольких метров толщины, используются в интроскопии, или внутривидении.

На способности частиц высоких энергий возбуждать и разрушать молекулы вещества, что приводит к образованию новых материалов, основана новая перспективная наука — радиационная химия.

Смертоносное действие определённых доз радиации на бактерии и насекомых можно использовать для дезинсекции и дезинфекции зерна, стерилизации медикаментов, консервирования пищевых продуктов, обеззараживания сточных вод.

Радиационное излучение служит верным помощником врачам и биологам, когда они стремятся стимулировать полезные для жизни процессы в живой клетке и приглушить вредные. Хорошо сфокусированный луч, несущий в себе огромную концентрацию тепловой энергии, можно использовать для резки и плавки металла, бурения горных пород. И наконец, тут таится решение ещё одной интереснейшей проблемы — транспортировки энергии на большие расстояния...

Не надо смешивать радиацию с радиоактивностью. Радиоактивные элементы, излучающие радиацию неконтролируемо и непрерывно, чрезвычайно опасны. Сколько-либо заметное их количество в воздухе или воде приводит, попадая в организм человека, к нежелательным последствиям. Ускорители генерируют радиацию только в нужном месте и в нужный момент: в нерабочем состоянии они так же безопасны, как выключенный рентгеновский аппарат или трансформаторная будка. Что касается самих облучённых материалов, включая продукты питания, то они не содержат никакой наведённой радиоактивности, пользоваться ими так же безопасно, как держать в руках рентгеновский снимок ваших лёгких или желудка..."

Г.И. Будкер, 1969 г.

(http://www.inp.nsk.su/~tararysh/accel/Beam_r.html).

В 1960-е годы хорошими параметрами мощных промышленных ускорителей электронов являлись энергия 1–1,5 МэВ и мощность электронного пучка 10 кВт. Это были ускорители прямого действия, главными элементами которых были генератор высокого напряжения и ускорительная трубка.

Вначале в ИЯФ были разработаны высоковольтные ускорители прямого действия трансформаторного типа. Эти ускорители поставлялись в исследовательские организации нашей страны и других стран, в том числе на опытный завод Всесоюзного научно-исследовательского института кабельной промышленности (ВНИИКП), где была подтверждена высокая эффективность электронно-лучевой модификации полимерной изоляции проводов и кабельных заготовок. По результатам этих работ в 1970 г. Министерство электротехнической промышленности СССР обратилось в ИЯФ с просьбой наладить производство ускорителей для работы на кабельных предприятиях отрасли. Первоначально было заказано 15 ускорителей. В техническом задании помимо повышения мощности электронного пучка оговаривались высокая надёжность машин при работе в заводских условиях, ремонтпригодность и простота в эксплуатации. После получения этого заказа в ИЯФ было решено не совершен-

ствовать старые машины трансформаторного типа (получившие соответственно название ускоритель электронов трансформаторного типа — ЭЛТ), а разработать новую модель на основе высоковольтного выпрямителя, которую назвали ЭЛВ.

Основой высоковольтного генератора ускорителей ЭЛВ является секционированный выпрямитель, каждая секция которого имеет собственную обмотку, выпрямитель и накопительные (фильтрующие) конденсаторы. Ускорители ЭЛВ характеризуются высоким коэффициентом полезного действия, компактностью, унифицированностью основных узлов и систем. Начиная с 1973 г. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера произвёл и запустил в работу в различных организациях Европы и Азии 170 ускорителей ЭЛВ, и 120 из них в настоящее время находятся в эксплуатации [10, 11].

В 1970-е годы в ИЯФ начали разработку высококачественных промышленных ускорителей типа "импульсный линейный ускоритель" (ИЛУ). Первые ускорители ИЛУ были разработаны как форинжекторы ускорительных комплексов ИЯФ. Форинжекторы ИЛУ работают в ИЯФ более 50 лет.

Первым был разработан передовой для своего времени импульсный линейный высокочастотный ускоритель электронов типа ИЛУ-6 с максимальной мощностью пучка до 20–40 кВт и диапазоном энергии 1,5–2,5 МэВ. Эти ускорители позволили увеличить толщину изоляции обрабатываемых кабельных изделий и термоусаживаемых трубок благодаря более высокой энергии — в 1970-е годы максимальная энергия ускорителей прямого действия не превышала 1,5 МэВ, а мощности пучка линейных высокочастотных ускорителей, работавших в диапазоне энергий от 6 до 10–12 МэВ, составляли 1–3 кВт, что было недостаточно для промышленного применения. В конце 1970-х годов начались поставки ускорителей ИЛУ-6 в промышленность [12].

4. Конструкция ускорителей серии ЭЛВ

На рисунке 1 показана конструкция ускорителей ЭЛВ. Секционированный высоковольтный выпрямитель 5 размещён внутри сосуда высокого давления 1. К днищу этого сосуда присоединено выпускное устройство 8 с высоковакуумными насосами 6 и другими элементами вакуумной системы. Ускорительная трубка 4 расположена внутри высоковольтного выпрямителя 5. Электроны, эмитированные инжектором, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию. Пройдя элементы вакуумной системы, электроны попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развёртки 7 равномерно распределяются по фольге выпускного окна и выводятся в атмосферу. Величина тока пучка регулируется блоком управления инжектором 2, расположенным внутри высоковольтного электрода 3. Электропитание от преобразователя частоты 400 Гц подаётся на вводы первичной обмотки 9. Облучаемый материал транспортируется под выпускным окном.

4.1. Высоковольтный выпрямитель

Источник высокого напряжения представляет собой каскадный генератор с параллельной индуктивной связью или, что то же самое, безжелезный трансформатор с секционированной вторичной обмоткой. Первич-

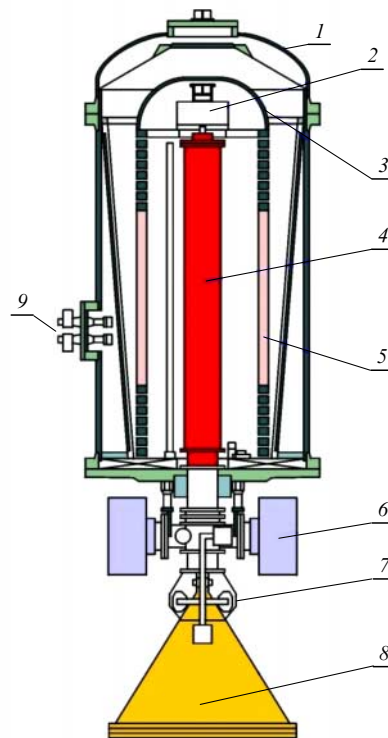


Рис. 1. Общий вид ускорителя ЭЛВ-4: 1 — сосуд, 2 — блок управления инжектором, 3 — высоковольтный электрод, 4 — ускорительная трубка, 5 — колонна выпрямительных секций, 6 — магниторазрядные насосы, 7 — электромагниты сканирования пучка, 8 — выпускное устройство, 9 — вводы первичной обмотки.

ная обмотка генерирует переменный магнитный поток частотой 400–1000 Гц, который индуцирует в каждой из катушек секций вторичной обмотки напряжение до 20 кВ. Это напряжение выпрямляется по схеме с удвоением напряжения внутри каждой секции. Выпрямительные секции соединяются между собой последовательно по постоянному напряжению. Сверху колонна выпрямительных секций заканчивается высоковольтным электродом, в котором располагается блок управления инжектором. Отметим, что в нашей конструкции отсутствует центральный магнитопровод, который имеется в "обычных" трансформаторах. 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 демфирующих сопротивлений обеспечивают надёжную 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 мы исходили из того, что даже большое число пробоев (несколько сотен и тысяч) не должно приводить к повреждениям высоковольтного выпрямителя. Отметим, что этот принцип неуклонно соблюдается и в настоящее время. Ускорители серии ЭЛВ с разными диапазонами энергии и мощности различаются числом выпрямительных секций и схемой их соединения. Энергия электронов регулируется изменением напряжения первичной обмотки.

4.2. Ускорительная трубка

Ускорительная трубка, как отмечалось, расположена внутри высоковольтной колонны, что требует, во-первых, экранирования пучка электронов от переменных магнитных полей первичной обмотки, а во-вторых, защиты самого высоковольтного выпрямителя от пере напряжений, которые могут возникнуть при вакуумных пробоях в ускорительной трубке. Экранирование от продольной составляющей магнитного поля достигается установкой на ускорительной трубке короткозамкнутых медных колец. Для экранирования поперечной составляющей магнитного поля внутрь колец вставлены полосы трансформаторной стали. Особенностью нашей ускорительной трубки является её большая апертура — 100 мм, что улучшает вакуумные условия в трубке, особенно в области катода. Благодаря этому снижаются также требования к точности сборки и юстировки как ускорительной трубки, так и инжектора электронов. В то же время большая апертура трубки способствует развитию обменных процессов (ионы — электроны) между электродами, имеющими высокий потенциал и потенциал земли. Для устранения эффекта было найдено оптимальное распределение потенциала вблизи катода, при котором вторичные частицы, рождённые на поверхности прикатодных электродов (на высоковольтном конце), фокусируются на выходе трубки. В последнее время было предложено запретить вторичные электроны. С этой целью вблизи прикатодных электродов создаётся потенциальный барьер для вторичных электронов, поэтому обменные процессы не развиваются. Это сразу же привело к существенному уменьшению времени вывода трубки на рабочие параметры. Тем не менее единичные пробои с интервалом в несколько десятков часов при работе с большим током наблюдаются.

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} . 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.

4.3. Устройства вывода 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. 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.

Выпускное окно закрывается титановой фольгой толщиной 50 мкм. В качестве уплотнения используется термостойкая резина. В последнее время перешли на металлическое уплотнение фольги выпускного окна. Материалом для уплотнителя служит оловянно-свинцовый сплав. Выпускные устройства выпускаются трёх размеров: при ширине окна 75 мм его длина может составлять 980, 1600 и 2000 мм.

Разработан набор устройств, повышающих качество и эффективность облучения [13, 14]. Так, для обработки цилиндрических объектов (проводов, кабелей, труб) оптимальным является радиальное или близкое к нему направление движения электронов на объекте. Для этой цели нами созданы магнитные системы, формирующие радиальную зону облучения, а также устройства, позволяющие облучать цилиндрические изделия с четырёх сторон.

Нами была разработана подпучковая транспортная система (рис. 2), которая перемещает кабель через зону облучения и позволяет синхронизировать его скорость и величину тока пучка для постоянства дозы. Одновременно подпучковая транспортная система предотвращает растяжение проводящей жилы при обработке проводов большого сечения. Для облучения плёночных материалов существует простая система повышения однородности поглощённой дозы по ширине облучаемого материала. При этом равномерность дозы по ширине изделия не хуже $\pm 4\%$.

Обладающий значительной мощностью электронный пучок может использоваться и как стерильный источник объёмного ввода тепла в обрабатываемый объект. Для этого разработаны устройства, выводящие в атмосферу сфокусированный электронный пучок [15, 16]. 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. Диаметр отверстий 1–2 мм. Рабочий вакуум в ускорительной трубке обеспечивается непрерывно работающими 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

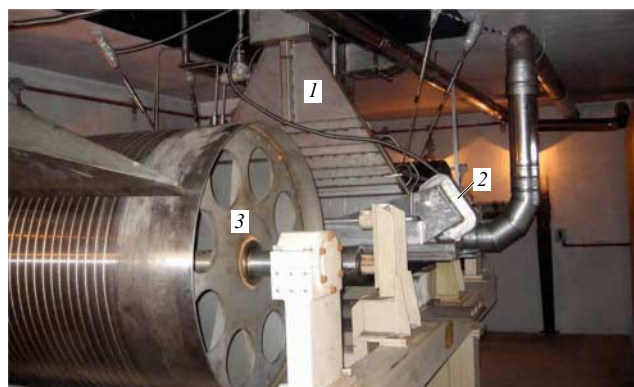


Рис. 2. Зал облучения ускорителя ЭЛВ: 1 — выпускное устройство, 2 — поворотные электромагниты системы четырёхстороннего облучения, 3 — подпучковая система транспортирования кабеля.

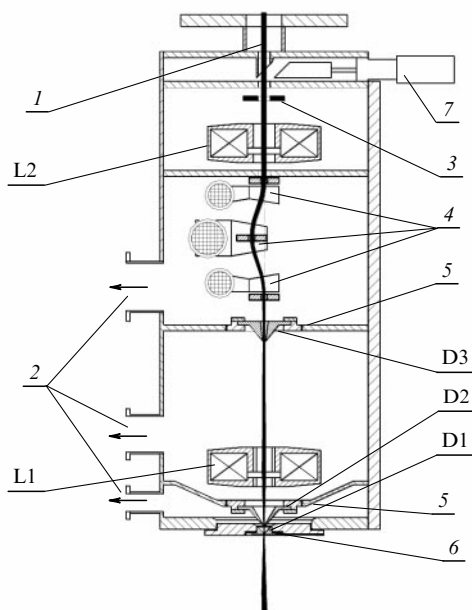


Рис. 3. Схема выпускного устройства для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка ускорителей серии ЭЛВ. L1 и L2 — магнитные фокусирующие линзы, D1, D2 и D3 — диафрагмы, 1 — пучок, 2 — патрубки вакуумпроводов откачки, 3 — измерительная диафрагма, 4 — перенос пучка, 5 — изоляторы фланцев диафрагм, 6 — щелевой сдвиг, 7 — электромагнитный вакуумный клапан.

выпускное устройство показано на рис. 3. Суть его работы заключается в следующем. Электронный пучок после выхода из ускорительной трубки фокусируется магнитной линзой L1. В кроссовере пучка расположена диафрагма D3. Далее, расширившись, пучок попадает во вторую линзу, L2, с ещё меньшим фокусным расстоянием. В кроссовере пучка этой линзы расположены две диафрагмы, D1 и D2. Газ, натекающий через отверстия в диафрагмах, эвакуируется вакуумными насосами через вакуумопроводы 2. Максимальный выводимый ток пучка ограничивается пульсациями ускоряющего напряжения. Хроматические aberrации приводят к увеличению размера пучка, что в свою очередь приводит к увеличению отверстий, прожигаемых пучком в диафрагмах. Пульсации допустимы на уровне 2–3 %.

Выпускное устройство включает в себя оборудование для параллельного переноса пучка 4, которое препятствует попаданию внутрь трубки по каналу пучка продуктов взаимодействия пучка с обрабатываемым материалом. Для этой же цели на выходе устройства установлен щелевой сдвиг 6. Устройство подсоединяется к ускорительной трубке через автоматический вакуумный клапан 7. Для экспериментов, в которых не требуются максимально высокие плотности мощностей, выпускное устройство может быть 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 адиабатическим сжатием пучка возрастающим продольным магнитным полем. Этот метод использован в ускорителе мощностью 500 кВт. Основное преимущество адиабати-

ческого сжатия — малая чувствительность размера пучка к изменениям энергии электронов, что особенно важно при создании ускорителей мощностью в несколько сотен киловатт, для которых проблема пульсаций и нестабильностей ускоряющего напряжения весьма актуальна. Ускорительная трубка и выпускное устройство расположены на одной оси, а магнитное поле плавно возрастает от 100 Гс на катоде до 10000 Гс в области выходных диафрагм. При этом размер пучка уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из напряжённости магнитного поля. Продольное магнитное поле создаётся системой соленоидов и катушек. Для его увеличения непосредственно в области выходных диафрагм применяется стальной концентратор. Максимальный выведенный в атмосферу ток для такой конструкции выпускного устройства составил 0,8 А.

4.4. Система управления

Система управления промышленным ускорителем в значительной степени определяет его эксплуатационные характеристики, такие как удобство управления, надёжность, длительность непрерывной работы, ремонтпригодность [17].

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 (включение преобразователя частоты, двигателя обдува фольги, развёрток и при необходимости технологического оборудования), следят за состоянием блокировок, после включения ускорителя выводят на заданный режим энергию и ток электронного пучка;

- надёжно 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;

- синхронизовать работу ускорителя и технологического оборудования; при этом возможна эксплуатация ускорителя в составе технологической линии в полностью автоматизированном режиме, т.е. без участия оператора;

- предоставить обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, тестирования и наладки ускорителя;

- архивировать параметры ускорителя и технологического процесса.

5. Параметры и применение 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 ИЯФ ускорителей, которые мы готовы поставить

Таблица. Параметры последних моделей ускорителей ЭЛВ

Тип ускорителя	Диапазон энергии, МэВ	Максимальный ток пучка, мА	Максимальная мощность, кВт
ЭЛВ-мини	0,2–0,4	50	20
ЭЛВ-0.5	0,3–0,5	130	65
ЭЛВ-3	0,5–0,8	100	50
ЭЛВ-4-1	0,5–1,0	100	100
ЭЛВ-4-1.5	1,0–1,5	66	100
ЭЛВ-6	0,8–1,2	100	100
ЭЛВ-6М	0,6–0,9	200	180
ЭЛВ-8	1,0–2,5	50	100
ЭЛВ-12	0,6–1,0	500	400

потребителям. Одно из основных требований, предъявляемых к промышленным ускорителям, — это их надёжность. Высокая степень надёжности ускорителей серии ЭЛВ была достигнута благодаря обобщению многолетнего опыта работы ускорителей в реальных условиях. Применение во всей серии ускорителей ЭЛВ унифицированных узлов и элементов позволяет нам, изменяя только их число и схему соединений и сохраняя по возможности условия работы, не снижать надёжности ускорителей новых типов, используя тем самым опыт многолетней эксплуатации предыдущих моделей. Следует отметить, что приведённая таблица является достаточно условной, поскольку мы можем адаптировать ускорители к любым требованиям заказчика в диапазоне энергий от 0,2 до 2,5 МэВ, токов до 100 мА и максимальной мощности до 100 кВт.

Начиная с 1973 г. по настоящее время было поставлено 170 ускорителей ЭЛВ, 120 из которых и сейчас эксплуатируются. ИЯФ является научно-исследовательским институтом, поэтому ресурсы для производства ускорителей ограничены, и мы не можем поставлять их в неограниченном количестве. В конце 1980-х годов в Москве на заводе имени Владимира Ильича было освоено производство наших ускорителей, однако из-за экономических потрясений это начинание прекратилось. В настоящее время нами осуществляется партнёрство с южнокорейской и китайской компаниями по совместному производству ускорителей.

Основными потребителями являются Китай (более 70 ускорителей), Южная Корея (25), Россия (15), Индия (7), Белоруссия (5). Ускорители ЭЛВ применяются практически во всех радиационно-химических технологических процессах, но главным образом они используются для радиационного модифицирования различных полимерных изделий: кабельная изоляция, термоусаживаемые ленты и трубки, производство вспененного полиэтилена и т.д. Часть ускорителей работает в исследовательских центрах, а также в качестве опытных установок экологической направленности — электронно-лучевая очистка сточных вод и выбросных газов. Существуют впечатляющие примеры применения ускорителей для решения экологических проблем. Так, с помощью электронно-лучевой обработки была ликвидирована экологическая катастрофа в г. Воронеже, когда городские водозаборы были загрязнены отходами завода синтетического каучука. В Южной Корее создана



Рис. 4. Зал электронно-лучевой обработки сточных вод красильного производства (г. Тэгу, Южная Корея). На фотографии видны выпускные устройства ускорителя ЭЛВ-12 и реакторы для обработки воды.

полномасштабная установка электронно-лучевой обработки стоков красильного производства. Именно для неё был разработан ускоритель ЭЛВ-12 с мощностью выведенного пучка 400 кВт. На рисунке 4 показан вид зала облучения этого комплекса. Однако следует отметить, что ни для обработки отходящих газов тепловых станций, ни для обработки сточных вод широкого применения ускорители так и не получили.

На базе ускорителя ЭЛВ-4 изготовлена установка для скоростной рентгеновской томографии [18]. Параметры электронного пучка следующие: энергия 1 МэВ, мощность 100 кВт. Электронный пучок в вакууме может быть сфокусирован до размера 1,5 мм. Ускорительная трубка, отделённая от высоковольтного источника, соединяется с ним посредством коаксиального токопровода с газовой изоляцией. Особенностью этой машины является возможность наклона ускорительной трубки на угол $\pm 30^\circ$ к вертикали. Ускоритель поставлен в научно-исследовательский Центр им. Гельмгольца Дрезден-Розендорф (Германия).

Высоковольтный выпрямитель ускорителя ЭЛВ используется в качестве источника высокого напряжения для ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией [19].

Разработаны и поставляются ускорители в местной радиационной защите, основное назначение которых — обработка материалов, используемых в производстве шин. Энергия этих ускорителей лежит в пределах до 0,5 МэВ, а ток 100 мА и более. К сожалению, эта технология до сих пор не развита в России.

Совместно с южнокорейской компанией EB TECH Co., Ltd разработан передвижной (мобильный) ускоритель. Ускоритель вместе с радиационной защитой размещены в трейлере, буксируемом автомобилем. Мощность электронного пучка составляет 20 кВт, а максимальная энергия — 0,65 МэВ. Электропитание всей установки может производиться как от стационарной сети, так и от собственного дизель-генератора.

В течение многих лет ведутся эксперименты на институтском стенде с ускорителем ЭЛВ-6, оборудованным устройством для вывода сфокусированного пучка в атмосферу. Они касаются не только электронно-терми-

ческих технологий, как то: сварка, резка, наплавка, закалка, переплав при атмосферном давлении, но и получения мелкодисперсных порошков (нанопорошков) различных материалов [20]. К сожалению, эти технологии по разным причинам оказались невостребованными.

6. Высокочастотные ускорители типа ИЛУ

В 1960-е годы мощность пучка линейных высокочастотных ускорителей не превышала 3 кВт из-за малой мощности клистронов и магнетронов, обеспечивающих генерацию высокочастотной мощности в дециметровом радиочастотном диапазоне.

Мощные высокочастотные генераторы в метровом радиочастотном диапазоне делаются на электронных лампах — триодах и реже на тетродах и других лампах, позволяющих создавать генераторы мощностью в несколько десятков и сотен киловатт. Опыт построения мощных и сверхмощных импульсных высокочастотных генераторов в этом диапазоне был накоплен при создании и эксплуатации радаров метрового диапазона.

С использованием этого опыта в мире делались попытки создать мощные высокочастотные ускорители, работающие в метровом радиочастотном диапазоне — с рабочей частотой менее 300 МГц. Первым решил эту задачу коллектив разработчиков из ИЯФ во главе с Вадимом Леонидовичем Ауслендером — в начале 1970-х годов был создан мощный импульсный высокочастотный ускоритель ИЛУ-6 с энергией до 1,5 МэВ и мощностью пучка до 20 кВт. Это был прорыв — мощность высокочастотного ускорителя была повышена на порядок. Работы по совершенствованию ускорителей ИЛУ продолжались, максимальная рабочая энергия ускорителя ИЛУ-6 была увеличена до 2,5 МэВ и достигнута максимальная мощность пучка 40 кВт при энергии 2 МэВ.

В ускорителе ИЛУ-6 было реализовано много оригинальных решений. Полуволновой резонатор ускорителя ИЛУ-6 с рабочей частотой в интервале 116–118 МГц работает в режиме стоячей волны, и между находящимися на оси резонатора выступами формируется переменное напряжение амплитудой до 2,5 МВ. Эти выступы образуют ускоряющий промежуток, в котором ускоряются электроны пучка, эмитированные инжектором, расположенным в верхнем выступе. Длина ускоряющего промежутка ускорителя (около 20 см) на порядок меньше длины волны (2,58 м для частоты 116 МГц). Электроны ускоряются за один проход в течение малой части положительного полупериода ускоряющего напряжения — когда напряжённость электрического поля на поверхности верхнего электрода будет достаточна для вытягивания электронов из инжектора.

По принципу ускорения ИЛУ-6 похож на ускорители прямого действия — электроны пучка за один проход приобретают энергию, равную разности потенциалов между электродами ускоряющего промежутка. В обычных линейных высокочастотных ускорителях дециметрового диапазона электроны ускоряются многократно меняющимся за время ускорения высокочастотным электрическим полем в стоячей или бегущей волне.

Для предотвращения развития внутри резонатора высокочастотного резонансного разряда (мультипактора) резонатор был составлен из двух изолированных частей, и на его нижнюю часть подавалось постоянное напряжение смещения.

Высокочастотный генератор на частоту 116–118 МГц был сделан по схеме с самовозбуждением на мощном ламповом триоде ГИ-50А с максимальной импульсной мощностью 3 МВт и максимальной длительностью импульса 0,7 мс. Это позволило генерировать импульсы тока электронного пучка длительностью 0,5–0,7 мс (большая часть высокочастотных ускорителей генерирует микросекундные импульсы тока пучка).

Высокочастотный генератор ускорителя ИЛУ-6 был размещён непосредственно на вакуумном баке ускорителя, обратная связь генератора осуществлялась через ускоряющий резонатор, что позволило значительно увеличить стабильность генерации. Такое решение дало возможность создать ускоритель без волноводной системы передачи мощности от генератора в резонатор ускорителя и тем самым избежать потерь высокочастотной мощности, а кроме того, уменьшить как размеры ускорителя, так и количество его элементов.

Генераторные триоды ГИ-50А являются существенно более дешёвыми и обладают большим ресурсом (временем работы), чем используемые в большинстве высокочастотных линейных ускорителей клистроны и магнетроны.

В процессе выхода на рабочий режим и при остановках, а также при изменении температуры охлаждающей воды температура резонатора меняется, что приводит к дрейфу его собственной частоты. Правильно настроенный самовозбуждающийся высокочастотный генератор ускорителя ИЛУ-6 (и других ускорителей ИЛУ) подстраивается под этот дрейф, и генерация продолжается с прежней отдаваемой мощностью. Это делает ускорители ИЛУ гибкими в эксплуатации и позволяет оперативно менять режимы работы. Для сравнения, мощным высокочастотным ускорителям производства SureBeam требуется 1,5–2 ч для выхода на рабочий температурный режим. Ускорители ИЛУ способны выходить на этот режим практически мгновенно.

6.1. Высокочастотный ускоритель ИЛУ-8

Ускоритель ИЛУ-8, подробно описанный в [21], был разработан в начале 1980-х годов, диапазон его рабочей энергии 0,8–1 МэВ, мощность пучка до 20 кВт. Он был предназначен для обработки проводов — от тонких монтажных до высоковольтных проводов системы зажигания двигателей внутреннего сгорания; позднее его стали применять для обработки термоусаживаемых трубок и плёнок. Эта продукция не требует большой глубины проникновения, поэтому была выбрана максимальная энергия 1 МэВ. При этой энергии глубина проникновения пучка составляет примерно 3 мм в большинстве полимерных материалов. Для круглых длинномерных изделий (термоусаживаемые трубки, провода, кабели и др.) применяется четырёхстороннее облучение.

Благодаря низкой максимальной энергии удалось создать малогабаритный ускоритель с размерами, позволяющими разместить его внутри местной биологической защиты, которая может быть установлена в стандартных цеховых помещениях. Доступ внутрь защиты обеспечивает откатная стена.

Для минимизации размеров установки рабочая частота резонатора была выбрана в интервале 176–178 МГц, а высокочастотный (ВЧ) генератор, выполненный в виде отдельной конструкции, размещался снаружи рядом с радиационной защитой.

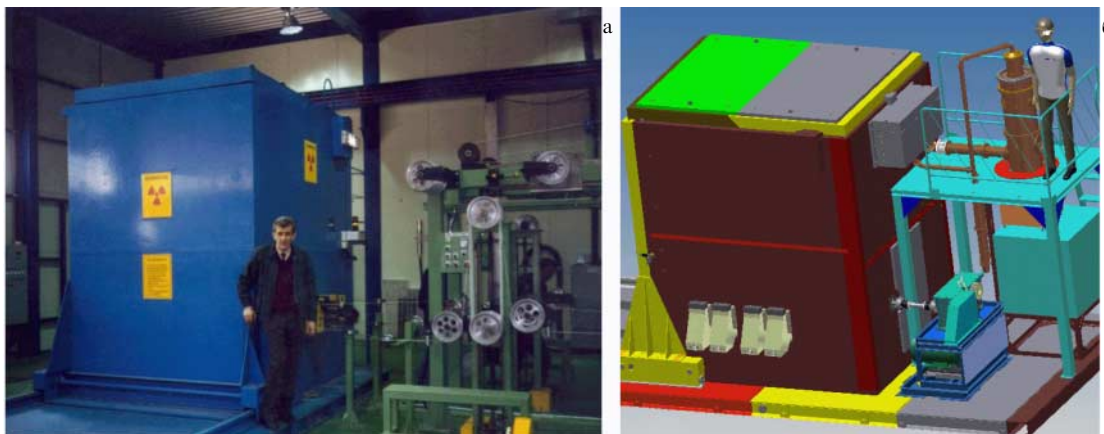


Рис. 5. (а) В.Л. Ауслендер, один из создателей ускорителей ИЛУ, рядом с ускорителем ИЛУ-8, находящимся внутри радиационной защиты. (б) Оборудование для перемотки трубок и проводов, цех фирмы KDK (город Йонбин, вблизи Сеула, Южная Корея).

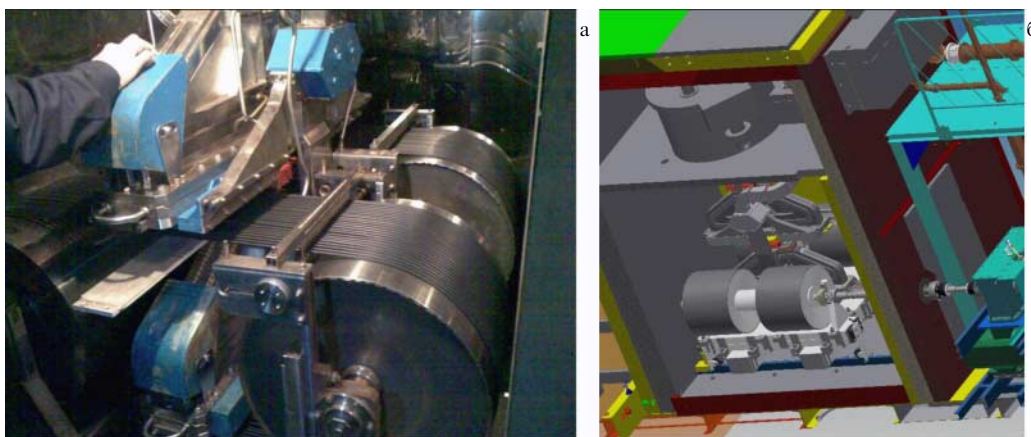


Рис. 6. Устройство выпуска пучка (а) и подпучковое перематывающее устройство для четырёхстороннего облучения трубок и проводов (б).

На рисунке 5а приведена фотография В.Л. Ауслендера рядом с коробом радиационной защиты с находящимся внутри ускорителем ИЛУ-8, видно также оборудование для перемотки трубок и проводов. Фотография сделана в цехе фирмы KDK (Южная Корея). На рис. 5б показаны короб радиационной защиты и расположенные рядом с ним высокочастотный генератор и привод подпучкового перематывающего устройства (в нижней правой части рисунка). На рисунке 6а приведена фотография устройства выпуска пучка и подпучкового перематывающего устройства для четырёхстороннего облучения трубок и проводов, сделанная в цехе корейской фирмы KDK, а на рис. 6б показано размещение ускорителя, устройства выпуска пучка и перематывающего устройства внутри короба местной защиты.

Стандартная защита представляет собой стальной короб, разделённый на две части. В верхнем отделении находятся вакуумный бак ускорителя и его вспомогательное оборудование. В нижнем отделении размещаются устройство выпуска пучка и перематывающее устройство, обеспечивающее транспортировку длинномерных изделий под пучком. В боковой стене защиты предусмотрены лабиринты для ввода и вывода облучаемой продукции.

Вес защиты 76 т, она может быть установлена в любом цехе, имеющем достаточную высоту (не менее 4 м).

Возможно также размещение ускорителя ИЛУ-8 в компактном бетонном бункере.

6.2. Высокочастотный ускоритель ИЛУ-10

В 1990-е годы был разработан ускоритель ИЛУ-10 с энергией до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт, в основном повторяющий конструкцию ускорителя ИЛУ-6; отличия заключаются в том, что его резонатор выше и на нём установлены два высокочастотных генератора, что позволило увеличить максимальную энергию до 5 МэВ и мощность пучка до 50 кВт. Подробное описание ускорителя ИЛУ-10 приведено в [22].

Высокая добротность резонатора (шунтовое сопротивление резонатора ускорителя ИЛУ-10 9 МОм) и использование двух ВЧ-генераторов позволили обеспечить максимальную рабочую энергию ускорителя 5 МэВ и мощность пучка до 50 кВт. Высота ИЛУ-10 вместе с генераторами составляет 2,4 м. На рисунке 7 показаны схема конструкции ускорителя ИЛУ-10, его вакуумный бак с ускоряющей структурой внутри и двумя высокочастотными генераторами, установленными на нём, а также линейное выпускное устройство и конвейер с обрабатываемой медицинской продукцией, упакованной в коробки.

Стандартная длина выпускного окна ускорителей ИЛУ 980 мм; возможно изготовление выпускных устройств с большей длиной выпускного окна в соответствии с тре-

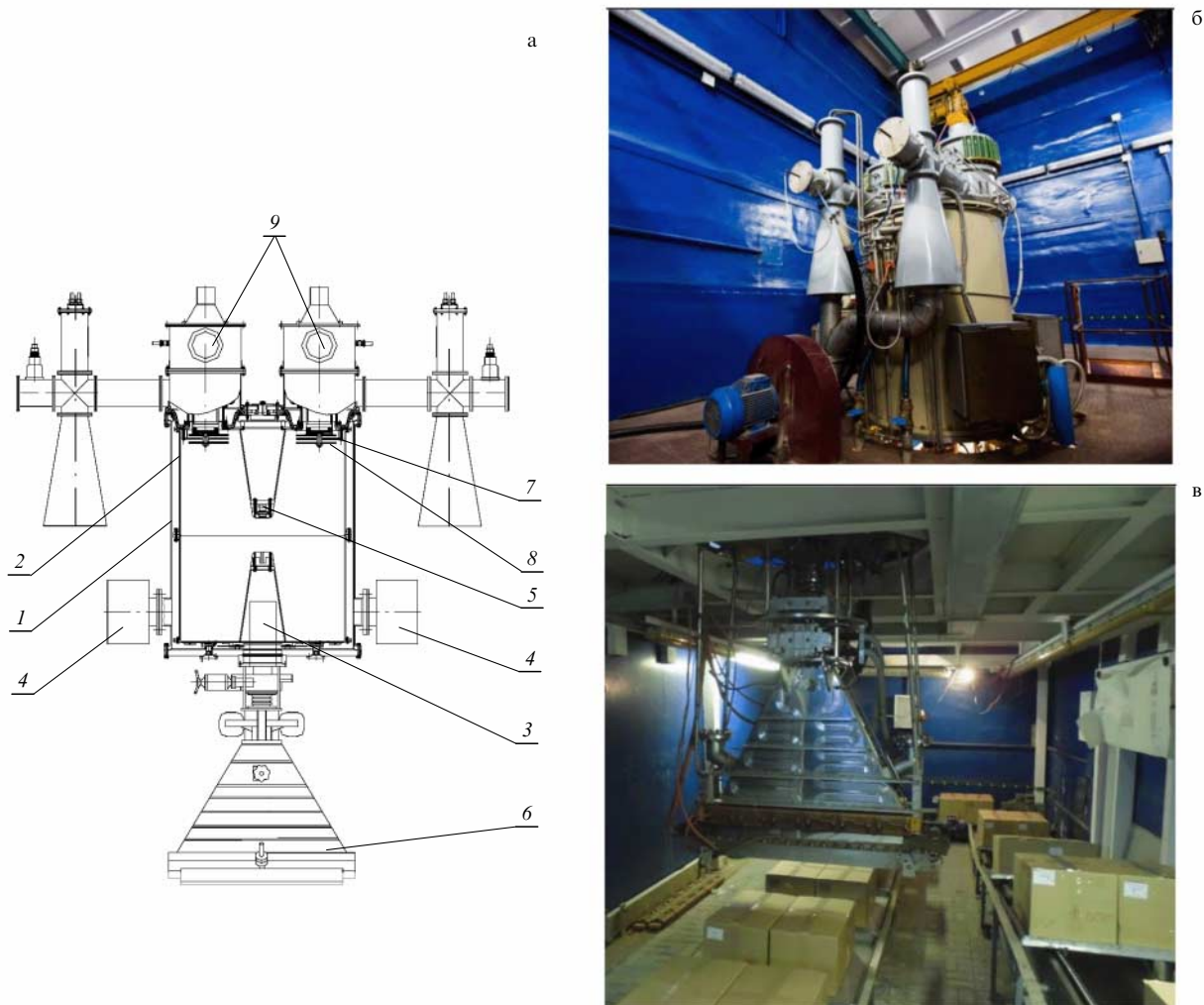


Рис. 7. Схема конструкции ускорителя ИЛУ-10 (а), вид ускоряющей структуры (б) и выпускного устройства (в). 1 — вакуумный бак, 2 — резонатор, 3 — фокусирующая линза, 4 — магнеторазрядные насосы, 5 — инжектор электронов, 6 — выпускное устройство — линейная развёртка, 7 — петля связи, 8 — вакуумный конденсатор петли связи, 9 — ВЧ-генератор.

бованиями заказчика. Для четырёхсторонней обработки проводов и кабелей ускоритель ИЛУ-10 оснащается многооконным выпускным устройством для четырёхстороннего облучения, аналогичным показанному на рис. 6.

Ускоритель ИЛУ-10 применяется для обработки толстостенных полимерных изделий (термоусаживаемые трубки, провода, кабели и др.) и стерилизации медицинских изделий. Перспективное направление использования этого ускорителя — обработка пищевых продуктов и продукции сельского хозяйства для улучшения их сохранности и увеличения срока хранения, а также предотвращения распространения инфекций.

Энергия 5 МэВ позволяет экономически эффективно работать в режиме генерации тормозного излучения, проникающая способность которого такая же, как и излучения изотопных источников, но тормозное излучение обладает выраженной сонаправленностью с пучком, что повышает эффективность его использования.

Для ускорителя ИЛУ-10 разработан конвертор для генерации тормозного излучения, оперативно устанавливаемый непосредственно под выпускным окном ускорителя. Это позволяет обрабатывать продукцию как электронным пучком, так и тормозным излучением. Переход

от одного вида обработки к другому занимает несколько минут.

Мощность тормозного излучения при энергии электронов 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт составляет около 4 кВт, что соответствует активности изотопного источника 294 кКи. Проникающая способность тормозного излучения на порядок превосходит проникающую способность электронного пучка с энергией 5 МэВ [2], поэтому его применение оправдано, если проникающая способность электронного пучка не будет достаточной для обработки всего внутреннего объёма продукции. В этом случае потеря мощности ионизирующего излучения оказывается приемлемой.

6.3. Высокочастотные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14

Рост рынка одноразовых медицинских изделий и расширение использования ускорителей электронов для обработки пищевых продуктов вызвали спрос на мощные ускорители с энергией до 10 МэВ и мощностью пучка в несколько десятков и сотен киловатт.

Расчёты и опыт работы показали, что однорезонаторная система становится энергетически невыгодной при энергии свыше 5 МэВ из-за возрастания потерь в резонаторе, которые пропорциональны квадрату напря-

жения на резонаторе. Поэтому для достижения более высоких энергий выгоднее разместить несколько резонаторов последовательно и производить ускорение электронов пучка в нескольких ускоряющих промежутках — это аналог многорезонаторной ускоряющей структуры линейных высокочастотных ускорителей. В ИЯФ выбрали такой вариант развития ускорителей ИЛУ.

Такая ускоряющая структура обладает преимуществом в сравнении с ускоряющей структурой ускорителей Rhodotron [2] производства фирмы ИВА, в которых используется сложная магнитная система для организации многопроходного ускорения электронов с множеством поворотов. Сложность магнитной поворотной системы ускорителей типа Rhodotron определяет их высокую стоимость и сложность в эксплуатации.

В ускорителях типа Rhodotron, как и в ИЛУ, используется резонатор метрового радиочастотного диапазона, работающий в режиме стоячей волны, его питание осуществляется от высокочастотного генератора на ламповых тетрадах.

В ИЯФ была разработана модульная многорезонаторная ускоряющая структура, в которой ускорение электронов пучка происходило последовательно в нескольких ускоряющих зазорах, и проведено моделирование этой структуры. На основе разработанной структуры были созданы многорезонаторные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14 с диапазонами энергии 5–7,5 МэВ и 7,5–10 МэВ соответственно, мощностью пучка до 60 кВт и до 100 кВт и рабочей частотой ускоряющей структуры 176–178 МГц. Описание ускорителя ИЛУ-14 приведено в [23].

На рисунке 8 показаны внешний вид ускоряющей структуры ускорителя ИЛУ-14, установленной у заказчика, и её конструкция. Длина структуры 7,16 м, суммарная длина вместе с выпускным устройством 8,4 м. Для питания ускоряющих структур этих ускорителей используются двухкаскадные самовозбуждающиеся ВЧ-генераторы на триодах ГИ-50А. Ввод ВЧ-мощности в струк-

туру осуществляется сверху через коаксиальные волноводы, которые видны на фотографии. Реализовано несколько вариантов генераторов, в наиболее мощном варианте второй каскад состоит из четырёх параллельно работающих триодов.

Ускоряющая структура ускорителя ИЛУ-14 состоит из пяти основных резонаторов, двух торцевых резонаторов и шести резонаторов связи. Торцевые резонаторы вдвое короче основных резонаторов. Такое построение выбрано для равномерного распределения высокочастотной мощности, подаваемой через коаксиальные волноводы в основные резонаторы (первый, второй, четвёртый и пятый). Сигнал обратной связи для высокочастотного генератора поступает из центрального (третьего) основного резонатора.

Электроны пучка ускоряются в промежутках основных и торцевых резонаторов, после каждого ускоряющего промежутка они движутся в тракте пучка по инерции и подлетают к следующему ускоряющему промежутку в соответствующей фазе, чтобы продолжить ускорение. Набираемая пучком энергия определяется суммой амплитуд ускоряющих напряжений на всех ускоряющих промежутках и плавно регулируется в достаточно широком интервале — от 7,5 до 10 МэВ.

Сигнал обратной связи для ВЧ-генератора поступает из ускоряющей структуры, поэтому температурный дрейф собственных частот ускоряющей структуры приводит только к изменению частоты генерации, но не к уменьшению мощности электронного пучка.

Ускоритель ИЛУ-14, работающий в режиме генерации тормозного излучения, в течение нескольких лет используется для радиационной модификации политетрафторэтилена. В России разработан радиационный способ структурного модифицирования политетрафторэтилена [24], который позволил увеличить износостойкость материала в 10^4 раз и снизить ползучесть в 10^2 раз.

7. Конверторы для генерации тормозного излучения

При торможении электронного пучка в веществе генерируется тормозное электромагнитное излучение, которое для краткости называют тормозным излучением. Энергетический спектр этого излучения и его пространственное распределение определяются энергией электронного пучка и материалом вещества мишени, ширина спектра — от радиочастотного шума до энергии, немного меньшей энергии пучка.

Интенсивность генерации тормозного излучения пропорциональна энергии электронного пучка и атомному номеру Z материала мишени, поскольку высокоэнергетическая часть спектра тормозного излучения генерируется в процессе рассеяния электронов в электрическом поле вблизи атомного ядра, которое прямо пропорционально Z .

Гамма-кванты электромагнитного тормозного излучения имеют нулевой заряд и поэтому обладают существенно более высокой проникающей способностью, чем породивший их электронный пучок. Низкоэнергетичную часть спектра тормозного излучения требуется отфильтровывать, для того чтобы избежать поступления большой поверхностной дозы на обрабатываемую продукцию.

Гамма-излучение генерируется также в процессе распада нестабильных изотопов. Физически оба вида излуче-

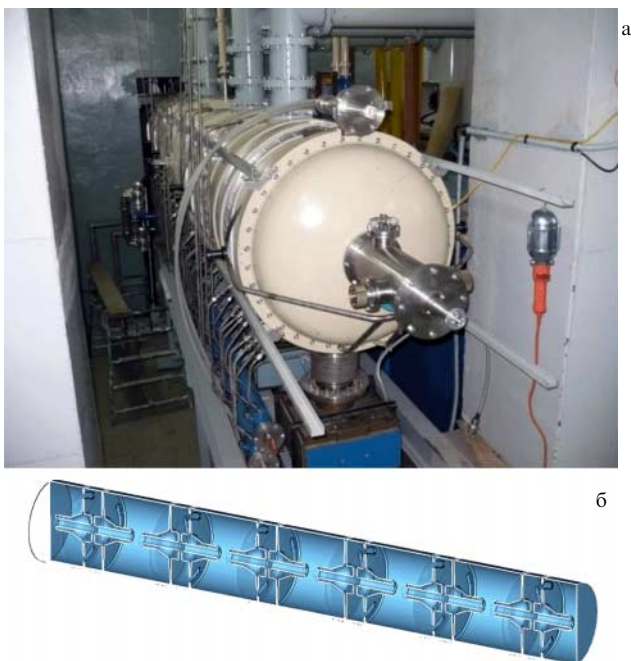


Рис. 8. Внешний вид (а) и строение ускоряющей структуры (б) многорезонаторного ускорителя ИЛУ-14.

ния одинаковы — это гамма-кванты, но порождённые различными физическими процессами.

Для обработки пищевых продуктов тормозным излучением законодательно установлен верхний порог энергии электронного пучка 7,5 МэВ в США и 5 МэВ в Европе.

Проникающая способность тормозного излучения, генерируемого электронным пучком с энергией в интервале от 5 до 7,5 МэВ, практически не отличается от проникающей способности излучения изотопных источников, поэтому ускорители электронов, работающие в режиме генерации тормозного излучения, являются экономически конкурентоспособной альтернативой изотопным источникам.

Разработка мишени для генерации мощного тормозного излучения — это серьёзная научная и технологическая задача, поскольку требуется найти баланс между многими влияющими друг на друга параметрами. Основные четыре задачи перечислены ниже.

Первая задача — выбор материала и оптимальной толщины мишени. Материал мишени должен обладать максимально возможным значением Z для эффективной генерации тормозного излучения, являться не слишком дорогим, доступным на рынке, технологичным в обработке и совместимым с другими материалами, используемыми в конструкции мишени, и т.д. Для отвода тепла необходимо обеспечить надёжный тепловой контакт мишени с охлаждающим потоком воды, учитывая тепловые деформации системы в процессе работы. Оптимальным материалом для мишени является тантал с $Z = 73$ — твёрдый, пластичный, хорошо поддающийся механической обработке материал, который можно приобрести на рынке без особых проблем — существует номенклатура его типоразмеров, в которых он выпускается, и его цена не служит ограничивающим фактором.

Вторая задача — выбор оптимальной толщины мишени. Тормозное излучение поглощается материалом мишени, поэтому в излишне толстой мишени будут большие потери на поглощение. При малой толщине мишени электронный пучок будет проходить через неё, и мощность пучка не будет полностью использована для генерации тормозного излучения.

Третья задача — обеспечение теплоотвода от мишени. Мощность электронного пучка, используемого для генерации тормозного излучения, от 50 кВт (ИЛУ-10) до 100 кВт (ИЛУ-14), и большая часть мощности выделяется в мишени.

Четвёртая задача — обеспечить фильтрацию низкоэнергетической части спектра тормозного излучения и прошедших через мишень электронов пучка, чтобы избежать большой поверхностной дозы в обрабатываемой продукции.

В мишенях для ускорителей ИЛУ используется тонкая танталовая пластина, которая герметично закрывает канал для охлаждающей воды, сформированный на несущем основании. Таким образом, танталовая пластина охлаждается непосредственно потоком воды. Слой воды после мишени и металлическая стенка канала служат также фильтром, поглощающим низкоэнергетическую часть спектра тормозного излучения.

Толщины танталовой пластины для различных энергий электронного пучка были определены в результате численного моделирования процессов генерации тормозного излучения. Многолетняя практика работы конверторов подтвердила эффективность их конструкции. В

конверторе на энергию 5 МэВ используется танталовая пластина толщиной 0,7 мм, такой конвертор обеспечивает степень конверсии мощности пучка 12 % в угол 360° , при этом расчётная степень конверсии в поглощённую продукцией мощность тормозного излучения (в угол 60°) составляет 8,3 %. Для работы на энергии 7,5 МэВ используется танталовая пластина толщиной 0,9 мм, это обеспечивает степень конверсии мощности пучка 16,9 % в угол 360° , и расчётная степень конверсии в поглощённую продукцией мощность тормозного излучения (в угол 60°) составляет 13,2 %.

Чем выше энергия электронов в пучке, тем выше интенсивность генерации тормозного излучения и более чётко выражена его пространственная направленность вдоль линии падения электронного пучка. В диапазоне энергии 5 МэВ и выше более 70 % мощности генерируемого конверторами тормозного излучения излучается в угол 60° относительно направления движения пучка, что выгодно отличает ИЛУ от активных элементов изотопных источников. Это позволяет обрабатывать продукцию за один или два прохода (в случае двухстороннего облучения) на конвейере под конвертором, тогда как конвейер изотопного источника обычно выполняется многоярусным и многооборотным (вокруг активных элементов) для полного использования анизотропно распределённой мощности гамма-излучения.

Ускорители обладают колоссальным преимуществом над изотопными источниками, поскольку они могут обрабатывать продукцию не только тормозным излучением, но и электронным пучком с более чем на порядок высокой производительностью.

Ускоритель ИЛУ-10 при энергии 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт генерирует тормозное излучение мощностью около 4 кВт, что соответствует 294 кКи активности изотопного источника, в то время как обработка электронным пучком мощностью 50 кВт соответствует активности источника 3650 кКи. При энергии 5 МэВ и мощности пучка 60 кВт мощность тормозного излучения ускорителя ИЛУ-12 составляет 4,8 кВт, что приблизительно соответствует 350 кКи активности изотопного источника.

Для работы с ускорителем ИЛУ-14 разработаны конверторы, рассчитанные на мощность электронного пучка до 100 кВт. При энергии 7,5 МэВ мощность тормозного излучения ускорителя ИЛУ-14 составляет около 13,2 кВт, что соответствует активности изотопного источника 968 кКи. Обработка электронным пучком мощностью 100 кВт (ИЛУ-14) соответствует работе изотопного источника с активностью 7300 кКи. Время установки мишени под выпускным окном ускорителей ИЛУ составляет несколько минут, столько же времени занимает и обратный процесс.

Помимо высокой производительности обработки у ускорителей есть очень важное преимущество — по сути, они являются электротехническим оборудованием, поэтому не могут стать источником радиоактивного загрязнения в случае аварийной ситуации.

8. Ускорители ИЛУ в ИЯФ и работы по исследованию радиационных процессов

В ИЯФ создана инфраструктура для исследования радиационных процессов и радиационной обработки продукции.

Один из двух ускорителей ИЛУ-10 с энергией до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт с конвейерной системой подачи продукции в зону облучения эксплуатируется совместно ИЯФ и Новосибирским государственным университетом. Ускоритель является постоянно загруженным обработкой медицинской продукции и других продуктов, обеспечивая потребности Сибирского федерального округа. Кроме того, на нём периодически проводятся исследования по разработке радиационных технологий.

Другой ускоритель ИЛУ-10 снабжён столиком для транспортировки продукции в зоне облучения, поэтому он в основном применяется для отработки радиационных процессов и периодически используется в режиме генерации тормозного излучения для обработки продукции, которая не может быть обработана электронным пучком с энергией 5 МэВ.

В ИЯФ с конца 1970-х годов работает ускоритель ИЛУ-6 с диапазоном энергии 1,6–2,5 МэВ. Этот ускоритель оснащён подвижным столиком для транспортировки продукции в зоне обработки. Иногда ИЛУ-6 работает также в режиме генерации тормозного излучения. Этот ускоритель используется в основном для отработки радиационных технологий, изучения воздействия мощного электронного пучка на различные материалы и химические соединения, а также иногда для обработки малых партий продукции. На ИЛУ-6 проводятся эксперименты по радиационно-термической обработке, так как эта установка оборудована дополнительным измерительным оборудованием. Ускоритель имеет систему регулирования мощности пучка в зависимости от температуры облучаемого объекта и обеспечивает возможность программируемого нагрева для изучения явлений, связанных с фазовыми переходами в объекте.

За прошедшие десятилетия на ИЛУ-6 было разработано много радиационных технологий, начиная от технологии облучения проводов и кабелей, радиационно-термического синтеза [25–28] и до стерилизации медицинских изделий, синтеза лекарственных средств и подготовки имплантатов [29]. В ИЯФ регулярно проводятся исследования радиационной стойкости конструктивных материалов [30].

В ИЯФ разрабатывают источники синхротронного излучения и диагностическую аппаратуру, а также развивают методики проведения структурных исследований различных материалов и хода структурных превращений. Результаты воздействия интенсивного электронного пучка на различные материалы удобно исследовать в ИЯФ с использованием синхротронного излучения сразу же после обработки. Результаты проведённых в ИЯФ исследований описаны в [31–51].

9. Заключение

ИЯФ разрабатывает и производит мощные промышленные ускорители электронов разных типов: ускорители прямого действия типа ЭЛВ и высокочастотные линейные ускорители типа ИЛУ — и вместе они перекрывают весь диапазон энергий, используемых для промышленной электронно-лучевой обработки, — от 0,2 до 10 МэВ.

Ускоритель ИЛУ-10 является самой компактной машиной с энергией 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт. (Размеры ускорителя определяют размеры биологической защиты и количество бетона, требующегося

для её строительства, что для производства может иметь большое значение.)

Высокочастотные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14 работают в диапазоне высокой энергии промышленных ускорителей (5–10 МэВ), максимальная мощность их пучка 100 кВт. Мировыми лидерами по мощности пучка в диапазоне энергий 5–10 МэВ являются ускоритель ИЛУ-14 и ускорители типа Rhodotron производства фирмы ИВА.

Для ускорителей ИЛУ-10, ИЛУ-12 и ИЛУ-14 разработаны эффективные конверторы для генерации тормозного излучения. В режиме генерации тормозного излучения эти ускорители способны заменить изотопные источники.

В обзоре МАГАТЭ [2] ИЯФ назван как одна из немногих организаций в мире, которые завоевали доверие промышленности как поставщики надёжных промышленных ускорителей.

В промышленности работают и классические линейные высокочастотные ускорители с диапазоном энергий от 6 до 10 МэВ. Мощность большинства высокочастотных ускорителей не превышает 10–20 кВт, максимальную мощность пучка 60 кВт показал опытно-промышленный линак производства фирмы SureBeam Corp.

Время выхода на рабочий режим работы у высокочастотных ускорителей производства SureBeam составляет 1,5–2 ч — это время требуется для стабилизации температурного режима ускоряющей структуры, поскольку при изменении температуры изменяются настройки ускоряющей структуры и волноводов связи. В ускорителях ИЛУ благодаря высокочастотному генератору с самовозбуждением выход на режим осуществляется практически мгновенно.

Ускорители типа ИЛУ-10, разработанные и производимые в ИЯФ, являются на данном этапе наиболее перспективными российскими машинами для обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции, так как они генерируют электронный пучок с энергией 5 МэВ и мощностью до 50 кВт, что позволяет им работать также в режиме генерации тормозного излучения. В дальнейшем с развитием и расширением объёмов обработки будут востребованы ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14, генерирующие более мощный электронный пучок.

Современные ускорители электронов предпочтительнее изотопных источников ввиду достаточной надёжности, высокой экономической эффективности и отсутствия экологической угрозы, создаваемой радиоактивными изотопами.

170 промышленных ускорителей типа ЭЛВ и более 50 ускорителей типа ИЛУ на протяжении десятилетий работают в промышленности России, Китая, Казахстана, Индии, Польши, Германии и других стран.

Список литературы

1. Wideröe R "Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen" *Archiv Elektronik Übertragungstech.* **21** 387 (1928)
2. Industrial Radiation Processing With Electron Beams and X-rays (Vienna: IAEA techdoc, 1 May 2011 — Revision 6), <http://www.cirms.org/pdf/Industrial%20Radiation%20Processing%2020May%202011%20-%20Revision%206.pdf>
3. Chmielewski A G, Berejka A J "Radiation sterilization centres world-wide", Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products (Vienna: IAEA 2008); http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1313_web.pdf

4. Charlesby A *Atomic Radiation and Polymers* (London: Pergamon Press, 1960)
5. Пикаев А К *Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты* (М.: Наука, 1987)
6. Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products (Vienna: IAEA 2008); http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1313_web.pdf
7. Заславский Ю С *Радиационная стойкость смазочных материалов* (М.: Госатомиздат, 1961)
8. Топчиев А В, Полак Л С *Радиолиз углеводородов. Некоторые физико-химические проблемы* (М.: Изд-во АН СССР, 1962)
9. Алексахин Р М и др. "Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе Российской Федерации" *Вестник РАЕН* **1** 78 (2014)
10. Салимов Р А *УФН* **170** 197 (2000); Salimov R A *Phys. Usp.* **43** 189 (2000)
11. Kuksanov N K et al. *Rad. Phys. Chem.* **46** 481 (1995)
12. Ауслендер В Л, Салимов Р А *Атомная энергия* **44** 403 (1978)
13. Куksанов Н К и др. *Письма в ЭЧАЯ* **11** 950 (2014)
14. Куksанов Н К и др. *Кабели и провода* (4) 16 (2004)
15. Zimek Z, Salimov R A *Rad. Phys. Chem.* **40** 317 (1992)
16. Kuksanov N K et al. *Rad. Phys. Chem.* **57** 3–6 653 (1992)
17. Куksанов Н К и др. *Вопросы атомной науки и техники* (3) 211 (2012)
18. Kuksanov N K et al. *Rev. Sci. Instrum.* **83** 9 093707 (2012)
19. Домаров Е В и др. *ПТЭ* (1) 77 (2017)
20. Kuksanov N K et al. *Bull. Mater. Sci.* **34** 4677 (2011)
21. Ауслендер В Л и др. *ПТЭ* (3) 98 (2009)
22. Ауслендер В Л и др., в сб. *Сборник докладов Одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине* (СПб.: СПбГУ, 2005) с. 82
23. Брызгин А А и др. *ПТЭ*(3) 5 (2011); Bryazgin A A et al. *Instrum. Exp. Tech.* **54** 3 295 (2011)
24. Хатинов С А, Артамонов Н А *Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева* **52** (3) 89 (2008)
25. Sadykov V et al. *J. Power Sources* **196** 7104 (2011)
26. Садыков Ви др. *Электрохимия* **47** 4517 (2011)
27. Суржииков А П и др. *Изв. вузов. Физика* (1-2) 56151 (2013)
28. Анчарова У В и др. *Вестн. НГУ Сер. Физика* (4) 41 (2013)
29. Степанова А О и др. *Сибирский научный медицинский журн.* **36** (1) 36 (2016)
30. Петров В В, Пупков Ю А *ЖТФ* **86** (7) 65 (2016); Petrov V V, Pupkov Yu A *Tech. Phys.* **61** 1023 (2016)
31. Shkurupiy V A et al. *RadPhysChem* **63** 3 (2002)
32. Ауслендер В Л и др. *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Техническая физика и автоматизация* **58** 43 (2004)
33. Ауслендер В Л, Коробейников М В, Сербин В И *Вопросы атомной науки и техники, Сер. Техническая физика и автоматизация* **62** 12 (2007)
34. Панин С В и др. *Трение и смазка в машинах и механизмах* (12) 26 (2011)
35. Мержиевский Л А и др. *Динамика сплошной среды. Механика структурно-неоднородных сред* **127** 58 (2012)
36. Михайленко М А и др. *Химия в интересах устойчивого развития* **22** 49 (2014)
37. Mikhailenko M A et al. *Chem. Sustainable Development* **22** 47 (2014)
38. Ancharova U V et al. *IOP Conf. Ser.* **81** 012122 (2015)
39. Mikhailenko M A et al. *IOP Conf. Ser.* **81** 012123 (2015)
40. Korobeinikov M V et al. *IOP Conf. Ser.* **81** 012124 (2015)
41. Костишин В Г и др. *Таврический научный обозреватель* **4** (2015) декабрь
42. Kostishyn V G et al. *J. Nano- Electron. Phys.* **7** 4 04044 (2015)
43. Ancharova U V et al. *IOP Conf. Ser.* **110** 012110 (2016)
44. Lysenko E N et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **392** 1 (2017)
45. Tolochko B P, Zolotarev K V *J. Struct. Chem.* **57** 1288 (2016)
46. Trenikhin M V et al. *Fullerenes Nanotubes Carbon Nanostructures* **23** 9801 (2015)
47. Ivashchenko O V et al. *Nanotechnol. Russia* **10** 696 (2015)
48. Ancharova U V et al. *IOP Conf. Ser.* **110** 012110 (2016)
49. Ancharova U V et al. *Phys. Procedia* **84** 360 (2016)
50. Mikhailenko M A et al. *IOP Conf. Ser.* **168** 012109 (2017)
51. Ancharova U V et al. *IOP Conf. Ser.* **168** 012110 (2017)

Industrial electron accelerators developed at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS (BINP)

A.A. Bryazgin, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation
E-mail: A.A.Bryazgin@inp.nsk.su, kuksanov47@mail.ru, R.A.Salimov@inp.nsk.su

In the early 1960s, work on developing industrial high power electron accelerators was initiated by Academician G.I. Budker, BINP's founder and director. This review describes the arrangements and principles of operation of BINP-developed and produced high-power electron accelerators of ELV and ILU series. Since 1972, 170 ELV and more than 50 ILU machines have been shipped to many countries around the world, most of them still operational. International Atomic Energy Agency surveys rate the BINP as one of the few well-trusted global suppliers of reliable industrial accelerators.

Keywords: high power industrial electron accelerators, direct-action accelerator (DC machine), linear radio frequency accelerator (linac), accelerating tube, radio frequency cavity, beam extraction device, electron beam treatment, braking radiation, X-ray converter

PACS numbers: 07.77.Ka, **29.20.** – c, 41.75.Fr

Bibliography — 51 references

Received 15 January 2018, revised 16 March 2018

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (6) 672–685 (2018)

Physics–Uspekhi **61** (6) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.03.038344>