

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ СЕРИИ ЭЛВ: СОСТОЯНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ, РАЗВИТИЕ.

Ю.И. Голубенко, М.Э. Вейс, Н.К. Куксанов, С.А. Кузнецов,
Б.М. Корабельников, А.Б. Малинин, П.И. Немыгов, В.В. Прудников,
С.Е. Петров, Р.А. Салимов, В.Г. Черепков, С.Н. Фадеев.
(Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Сибирского отделения Российской академии наук)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В представленной работе приведены характеристики мощных ускорителей электронов непрерывного действия, описаны основные системы ускорителя и широкий набор дополнительных устройств, расширяющих диапазон применения ускорителей, показаны направления дальнейшего развития.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ

Начиная с 1971 года, Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит ускорители электронов типа ЭЛВ для применения их в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Ускорители типа ЭЛВ построены с использованием унифицированных систем и узлов, что позволяет с минимальными затратами адаптировать их под конкретные требования заказчика по таким основным параметрам как диапазон энергий, мощность в пучке ускоренных электронов, длина выпускного окна и т.д. Конструктивные и схемные решения предусматривают длительную непрерывную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства. Отличительными качествами ускорителей ЭЛВ являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность в работе.

Институт предлагает серию ускорителей электронов типа ЭЛВ, которые перекрывают диапазон энергий от 0,2 до 2,5 МэВ, с током пучка ускоренных электронов до 200 мА и максимальной мощностью до 160 кВт. К настоящему времени поставлено как внутри страны, так и за рубежом более 70 ускорителей, а их суммарная наработка превышает 500 ускорителе-лет.

Основные параметры ускорителей ЭЛВ приведены в Табл.1

Три нижние строчки этой таблицы занимают ускорители нового поколения. При относительно невысокой энергии они имеют большую мощность. Их конструкция ориентирована, главным образом, на решение экологических проблем.

Рис.1 дает представление о размерах ЭЛВ ускорителей.

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Общий вид ускорителя типа ЭЛВ с фольговым выпуском показан на Рис.2. Внутри котла, заполненного элегазом, расположены первичная обмотка, высоковольтный выпрямитель с встроенной внутрь ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. Именно расположение ускорительной трубки внутри колонны высоковольтного выпрямителя делает ускорители ЭЛВ наиболее компактными среди машин своего класса. К днищу котла прикреплены элементы вакуумной системы с выпускным устройством. Электроны, эмитированные катодом, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию, равную eU_0 . Пройдя сквозь элементы вакуумной системы они попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развертки равномерно распределяются по фольге, проходят тонкую фольгу и выводятся в атмосферу. Облучаемый материал транспортируется под рамкой выпускного окна.

Таблица 1

Основные параметры ускорителей ЭЛВ

Тип ускорителя	Диапазон энергий, МэВ	Мощность в пучке, кВт	Максимальный ток пучка, мА
ЭЛВ-мини	0.2 - 0.4	20	50
ЭЛВ-0.5	0.4 - 0.7	25	40
ЭЛВ-1	0.4 - 0.8	25	40
ЭЛВ-2	0.8 - 1.5	20	25
ЭЛВ-3	0.5 - 0.7	50	100
ЭЛВ-4	1.0 - 1.5	50	40
ЭЛВ-6	0.8 - 1.2	100	100
ЭЛВ-8	1.0 - 2.5	90	50
ЭЛВ-6М	0.75 - 1.0	160	200
ФАКЕЛ	0.5 - 0.8	500	800
ЭЛВ-12	0.6 - 1.0	400	400

На Рис.3 показана упрощенная электрическая схема ускорителей ЭЛВ. На Рис.4 представлен ускоритель ЭЛВ-4 в горизонтальном исполнении, а Рис.5 демонстрирует проект ускорителя ЭЛВ-6 в транспортируемом варианте.

На Рис.3 показана упрощенная электрическая схема ускорителей ЭЛВ. На Рис.4 представлен ускоритель ЭЛВ-4 в горизонтальном исполнении, а Рис.5 демонстрирует проект ускорителя ЭЛВ-6 в транспортируемом варианте.

Отметим, что в отличие от "обычных" трансформаторов центральный магнитопровод в нашей конструкции отсутствует. Данное обстоятельство, существ-

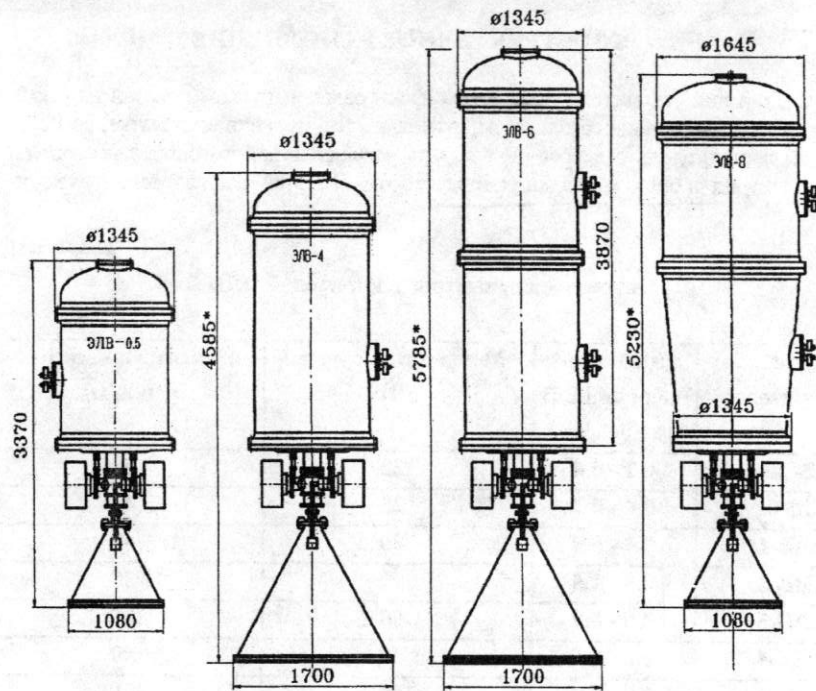


Рис.1 Габаритные размеры ускорителей серии ЭЛВ

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Источник высокого напряжения представляет собой каскадный генератор с параллельной индуктивной связью. Внутри первичной обмотки установлена колонна выпрямительных секций. Электрическая схема секции приведена на Рис. 6. Катушка вторичной обмотки содержит 3000 витков, а максимальное напряжение, индуцируемое на ее концах составляет ~ 20 кВ. Это напряжение выпрямляется по схеме с удвоением напряжения. Таким образом выходное напряжение выпрямительной секции составляет 40 кВ. Между собой выпрямительные секции соединяются либо последовательно (Рис.6а), либо последовательно-параллельно (Рис.6б). Выпрямители с последовательным соединением секций более высоковольтны, а с последовательно-параллельным - более сильноточны. Колонна выпрямительных секций заканчивается высоковольтным электродом, внутри которого располагается блок управления инжектором и специальная катушка для его электропитания.

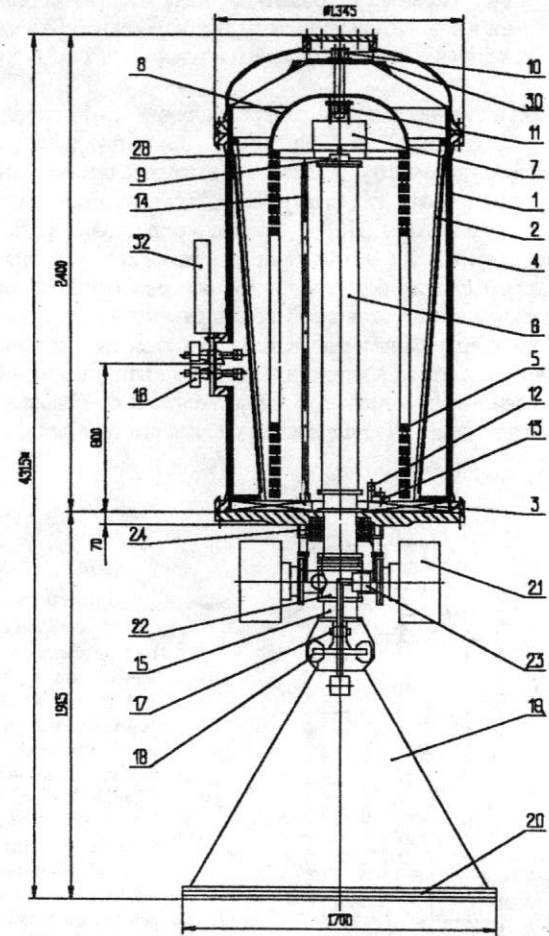


Рис.2 Общий вид ускорителя ЭЛВ-4.

1 - сосуд; 2 - первичная обмотка; 3, 4 - магнитопроводы; 5 - выпрямительные секции; 6 - ускорительная трубка; 7 - блок управления инжектором; 8 - высоковольтный электрод; 9 - инжектор; 10, 11 - оптические каналы управления инжектором; 12 - делитель секции; 13 - блок конденсаторов; 14 - делитель энергии; 15 - вакуумный затвор; 16 - выводы первичной обмотки; 17, 18 - катушки разверток; 19 - выпускное устройство; 20 - рамка выпускного окна; 21 - вакуумные насосы; 22 - крестовина; 23 - вакуумный затвор; 24 - магнитная линза; 28 - основание высоковольтного электрода; 30 - высоковольтный экран; 32 - клемник.

венно упрощая конструкцию источника высокого напряжения, практически не сказывается на эксплуатационных характеристиках выпрямителя, благодаря удачной конструкции первичной обмотки, наличие качественной системы стабилизации энергии и относительно низкому витковому напряжению (6 В/виток). Величина удельной мощности трансформатора в ускорителях ЭЛВ составляет около 40 кВт/метр.

Применение малоиндуктивных конденсаторов К-15-10, продуманная схема межсекционных соединений и наличие демпфирующих сопротивлений обеспечивают надежную защиту элементов высоковольтного выпрямителя от перенапряжений при пробоях как вакуумной, так и газовой изоляции. Вообще говоря, пробой в ускорителях ЭЛВ - явление чрезвычайно редкое, однако при конструировании ускорителей (а этот принцип неуклонно выполняется и сейчас) мы исходили из того, что даже большое число пробоев (сотни и тысячи) не должно приводить к повреждению высоковольтного выпрямителя.

Практика подтвердила высокую надежность высоковольтного выпрямителя. Единственная причина отказов в источнике высокого напряжения - отказы конденсаторов К-15-10 из-за микроразрядов. Предварительная отбраковка конденсаторов позволяет существенно повысить надежность работы выпрямителя.

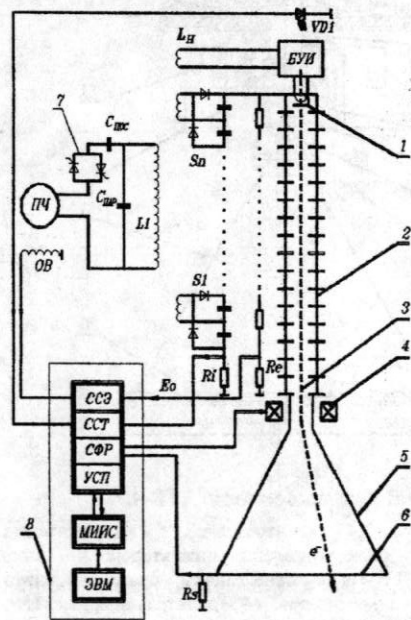


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема ускорителя ЭЛВ.

1 - катод электронной пушки, 2 - ускорительная трубка, 3 - электронный пучок, 4 - катушки системы формирования раstra, 5 - выпускное устройство, 6 - титановая фольга, 7 - тиристорный ключ, 8 - система управления (ССЭ - система стабилизации энергии, ССТ - система стабилизации тока, СФР - система формирования раstra, МИИС - модульная информационно-измерительная система, ЭВМ - управляющий компьютер, УСП - система управления силовым питанием). ПЧ - преобразователь частоты, БУИ - блок управления инжектором.

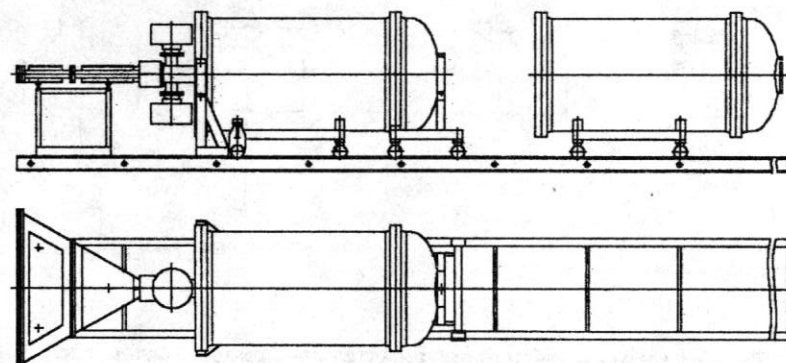


Рис. 4. Ускоритель ЭЛВ-4 в горизонтальном исполнении.
(Горизонтальная версия высоковольтного выпрямителя этого ускорителя была изготовлена и на ее основе в Институте сделан ионный имплантер)

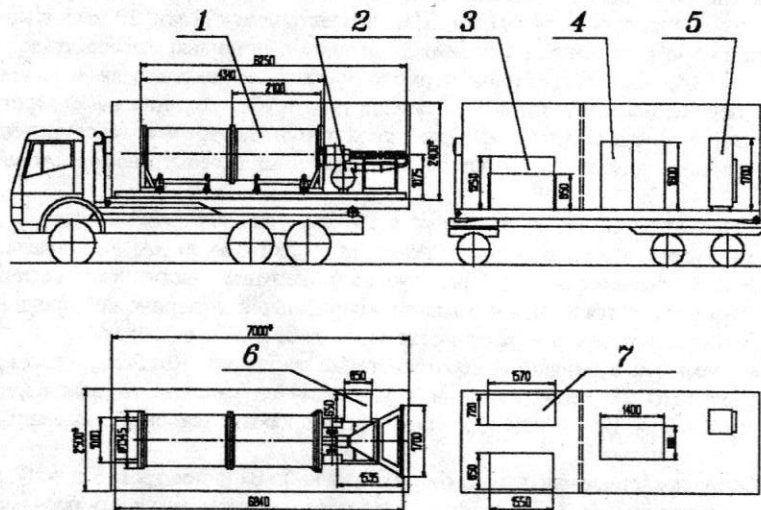


Рис. 5. Ускоритель ЭЛВ-6 в транспортируемом варианте.
(Этот проект, к сожалению, так и не был реализован по ряду причин не технического порядка).
1 - ускоритель; 2 - система охлаждения фольги; 3 - газовая система; 4 - силовой шкаф; 5 - система управления; 6 - вакуумная система; 7 - преобразователь частоты.

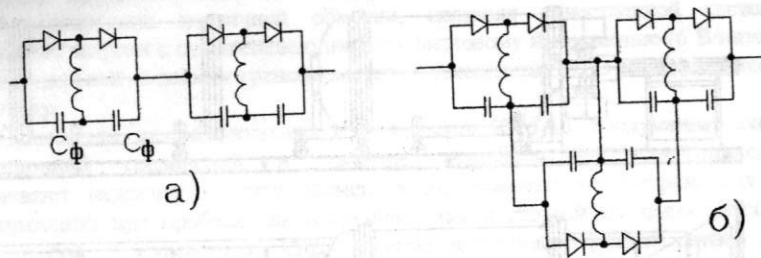


Рис. 6. Схемы соединений выпрямительных секций ускорителей ЭЛВ.

УСКОРЯЮЩАЯ ТРУБКА

Общий вид ускорительной трубки показан на Рис.7. Апертура канала составляет 100 мм. Этим обеспечиваются хорошие вакуумные условия в районе катода, а следовательно и большой срок его службы. Внешний диаметр изолятора - 205 мм, а внутренний - 180 мм. Шаг по электродам - 21 мм. 20 мм кольца из керамики УФ-46 соединяются с электродами либо с помощью высокомолекулярного клея ПВА, либо посредством термодиффузионной сварки. Для устранения влияния переменного магнитного поля снаружи трубка экранирована короткозамкнутыми медными кольцами. Для экранировки поперечной составляющей магнитного поля внутрь колец вставлено несколько слоев трансформаторного железа.

Разнос потенциала по электродам трубки осуществляется высокоомным делителем. Типичная величина тока делителя трубки - до 50 мкА. Распределение напряжения - равномерное, за исключением верхней части, где величина резисторов определяется исходя из условий максимальной электрической прочности трубки. Резисторы делителя укреплены непосредственно на электродах.

Максимальный рабочий градиент в трубке составляет 10 кВ/см, однако для режимов длительной, непрерывной и круглосуточной работы его величина не превышает 8 кВ/см. Вследствие этого вакуумные пробой в ускорительных трубках практически отсутствуют.

Катод, представляющий из себя таблетку из LaB_6 диаметром 6 или 10 мм, имеет косвенный подогрев. Для нагрева инжектора требуется мощность порядка 50 Вт. Величина тока пучка регулируется температурой катода, т.е. пучка работает в режиме отбора полного тока эмиссии. Для этой цели предназначены блок управления инжектором, который располагается под высоким потенциалом внутри высоковольтного электрода, и блок стабилизации тока пучка - в стойке управления. Система регулирования тока пучка обеспечивает его стабильность на уровне не хуже $\pm 0,3$ мА, что не превышает 1% от величины максимального тока пучка.

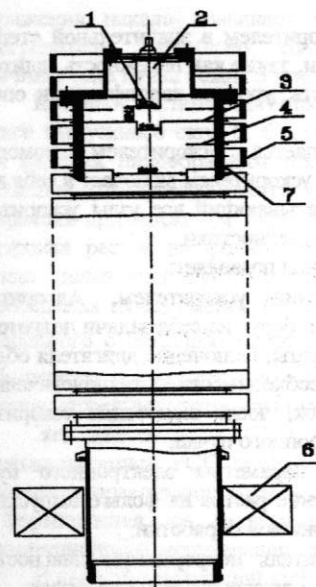


Рис.7. Общий вид ускорительной трубки
1 - катод; 2 - корпус инжектора; 3, 4 - электроды; 5 - экранирующие кольца; 6 - магнитная линза; 7 - керамика.

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.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Рабочий вакуум в ускорительной трубке обеспечивается 2-мя магниторазрядными насосами с производительностью 400 л/с каждый. Старт насосов обеспечивается форвакуумным агрегатом АВЗ-20 с азотной ловушкой. Как правило, этот агрегат используется лишь при первом старте после вскрытия вакуумной системы (сборка, смена фольги или катода). В дальнейшем, при нормальной эксплуатации, перерывы в работе продолжительностью до 2-х суток не требуют форвакуумной откачки для старта магниторазрядных насосов.

В конструкции вакуумной системы использованы достаточно простые и технологичные резиновые уплотнения, тем самым величина рабочего вакуума ограничивается на уровне 10^{-4} - 10^{-5} Па. Этот вакуум является вполне приемлемым, поскольку не снижается срок службы катода; рассеяние частиц на остаточном газе составляет величину порядка 10^{-6} от тока пучка, т.е. поток частиц на электроды трубки крайне незначителен и, следовательно, ее электрическая прочность при работе с пучком не снижается.

Величина вакуума измеряется по току магниторазрядных насосов. Система блокировок является двухступенчатой: при вакууме $5 \cdot 10^{-4}$ Па на терминал выводится предупреждение для оператора, а при вакууме 10^{-3} Па ускоритель выключается. Вакуумный затвор (поз. 15 на Рис. 2) позволяет производить замену катода без потери вакуума в выпускном устройстве или наоборот - замену фольги без герметизации ускорительной трубки.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления промышленным ускорителем в значительной степени определяет его эксплуатационные характеристики, такие как надежность, длительность непрерывной работы, ремонтно-пригодность, уровень квалификации операторов.

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.

Многофункциональность системы управления позволяет:

- Автоматизировать процесс управления ускорителем. Алгоритмы, заложенные в программу управления ускорителем, берут на себя задачи подготовки ускорителя к работе (разгон преобразователя частоты, включение двигателя обдува фольги, включение разверток и, при необходимости, технологического оборудования), следят за состоянием блокировок, после включения ускорителя выводят на заданный режим энергии и ток электронного пучка;
- Надежно стабилизировать основные параметры электронного пучка (энергия электронов, ток пучка, размер и положение раstra на фольге выпускного окна), что обеспечивает высокое качество радиационной обработки;
- Обеспечить в процессе работы ускорителя непрерывную диагностику высоковольтного выпрямителя и самотестирование других систем ускорителя;
- Синхронизировать работу ускорителя и технологического оборудования, при этом возможна эксплуатация ускорителя в составе технологической линии в полностью автоматизированном режиме, т.е. без участия оператора.
- Предоставить обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, тестирования и наладки ускорителя.

На рис. 3 показана функциональная схема связей ускорителя ЭЛВ с системой управления. Колонна высоковольтного выпрямителя, состоящая из последовательно соединенных выпрямительных секций $S_1 \dots S_n$, через первичную обмотку L_1 получает питание от преобразователя частоты ПЧ. Высокое напряжение измеряется с помощью резистивного делителя энергии и сигнал E_0 подается на вход системы стабилизации энергии ССЭ. Управляющее воздействие, пропорциональное разности между запрашиваемой и реальной энергией, подается на обмотку возбуждения ОВ преобразователя частоты ПЧ. Долговременная нестабильность энергии лежит в пределах 1-2%.

Положительный вывод высоковольтного выпрямителя соединен с "землей" через токоизмерительный резистор R_1 . Сигнал измерения тока выпрямителя I_0 поступает на вход системы стабилизации тока ССТ. Сигнал рассогласования с выхода этой системы через оптическую линию связи управляет выходным напряжением блока управления инжектором БУИ, подающим ток в подогреватель катода косвенного накала. Управление током пучка путем регулирования

напряжения накала повышает срок жизни катода, так как в этом режиме подогреватель потребляет минимально необходимый ток. Нестабильность величины тока пучка лежит в пределах 1% от его максимального значения.

Катушки системы формирования раstra 4 (см. Рис.3) сканируют пучок по фольге выпускного окна 6. Система формирования раstra обеспечивает питание этих катушек пилообразным током, питание линзы, автоматическую коррекцию положения (центровку) раstra пучка на фольге выпускного окна, отключение ускорителя при снижении токов разверток или линзы ниже допустимой величины. Центровка раstra на фольге осуществляется стабилизатором положения пучка. Сигнал положения пучка формируется путем аналоговой обработки сигнала токооседания пучка (менее 1% полного тока) на стенки выпускного устройства, измеренного с помощью резистора R_S . Если растр не отцентрован на фольге, стабилизатор положения пучка подаст корректирующий ток в соответствующую катушку коррекции положения пучка.

Эти три системы (ССЭ, ССТ, СФР), дополненные системой управления силовым питанием УСП, образуют нижний уровень системы управления - уровень оконечных управляющих блоков. Все управляющие команды, задания режимов и т. п. формируются на следующем уровне управляющей системы: модульной информационно-измерительной системой МИИС.

В качестве модульной информационно-измерительной системы используется секция КАМАК, включающая необходимый набор измерительных и управляющих модулей, либо специализированная для ускорителей ЭЛВ управляющая станция, выполненная на основе микропроцессора. Станция включает 64-х канальные вводные и выводные регистры, 12-ти разрядный АЦП с 64-х канальным аналоговым мультиплексором на входе, 16 12-ти разрядных ЦАП-ов.

На верхнем 3-м уровне системы управления находится управляющий компьютер, загруженный пакетом специализированного программного обеспечения. Программное обеспечение системы управления ускорителем обеспечивает дружелюбный интерфейс с пользователем посредством системы динамических меню, текстовой и графической визуализации режима работы ускорителя.

СИЛОВОЕ ПИТАНИЕ

Питание первичной обмотки ускорителя осуществляется переменным напряжением с частотой 400 Гц от преобразователя частоты. До настоящего времени применялись электромашинные генераторы, привлекающие своей дешевизной, простотой и надежностью. Единственным недостатком этих машин является относительно низкий КПД (65 - 80% в зависимости от мощности). Сейчас ведутся работы по переводу силового электропитания на статические преобразователи частоты (как тиристорные, так и транзисторные). При этом ожидается увеличение общего коэффициента полезного действия ускорителя до 85% для машин мощностью до 100 кВт и до 92% для более мощных ускорителей.

Конденсаторная батарея, включаемая между первичной обмоткой и преобразователем частоты, не только компенсирует реактивную составляющую мощности ускорителя, но и трансформирует величину входного сопротивления. Тем самым осуществляется согласование импедансов преобразователя частоты и ускорителя.

Тиристорный ключ предназначен для быстрого ($<10^{-3}$ сек) отключения ускорителя в случае аварийных ситуаций, как-то: пробой вакуумной или газовой изоляции, уменьшение тока разверток или линзы, отключение охлаждения фольги.

Все оперативные переключения в силовом электропитании производятся управляющей программой без участия оператора.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫВОДА В АТМОСФЕРУ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Выпускное устройство с окном из фольги

Схематический вид устройства для вывода пучка в атмосферу через фольгу приведен на Рис. 8. Электронный пучок с помощью двух электромагнитов сканирует по фольге в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Частоты сканирования находятся в соотношении 251/15, благодаря чему происходит полное заполнение

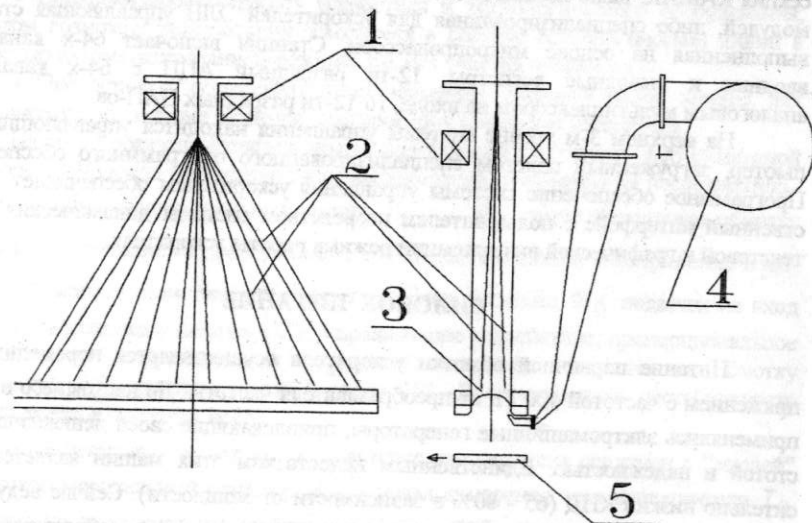


Рис. 8. Схематический вид выпускного устройства с окном из фольги

1-электромагниты сканирования; 2-траектории пучка; 3-фольга выпускного окна; 4-вентилятор обдува фольги; 5-подвижная мишень.

фольги и отсутствует наложение траекторий пучка. С низкой частотой пучок сканирует вдоль фольги, а с высокой - поперек. Частота сканирования вдоль

фольги, если нет специальных технологических требований, лежит в районе 50 Гц. Максимальный угол отклонения пучка составляет 30° . Фольга охлаждается воздушной струей. Для этой цели использован высоконапорный вентилятор, начальная скорость струи - 180-200 км/час. При данной скорости потока воздуха средняя плотность тока на фольге ускорителей ЭЛВ не превышает $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. При этом максимальная величина выводимого тока составляет $\sim 70 \text{ mA}/\text{m}$. Это примерно вдвое меньше, чем максимально-допустимое значение плотности тока на фольге для этой скорости струи. Двукратный запас по плотности тока через фольгу делает практически неограниченным срок ее службы.

На Рис. 9 приведено распределение линейной плотности тока на расстоянии 50 мм от рамки выпускного окна. Под линейной плотностью тока мы понимаем долю тока пучка, измеряемую длинным датчиком установленным поперек выпускного окна. Величина поглощенной дозы в движущемся облучаемом материале пропорциональна именно этому параметру. Обычно мы гарантируем равномерность линейной плотности тока не хуже $\pm 10\%$ на расстоянии не более 50 мм при использовании 90% тока пучка. Потери пучка на хвостах распределения обусловлены рассеянием электронов в фольге выпускного окна и воздухе.

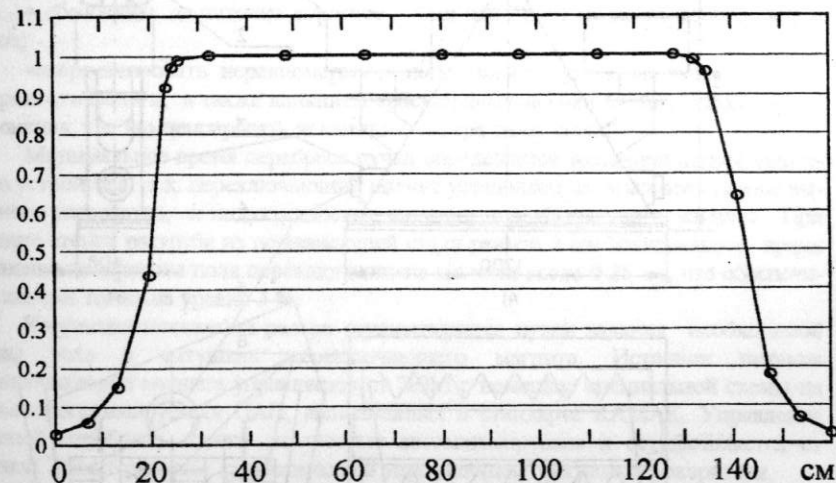


Рис. 9. Типовое распределение линейной плотности тока под рамкой выпускного окна. (Энергия электронов 1,5 МэВ.)

Двухоконное выпускное устройство

Как уже упоминалось выше, максимальный ток, выводимый через окно из фольги, составляет $70 \text{ mA}/\text{m}$. Применение радиационных технологий в крупномасштабных промышленных производствах (очистка отходящих газов ТЭЦ, металлургических

производств; обработка сточных вод и др.) требует увеличения единичной мощности ускорителей до уровня сотен киловатт. Оптимальная энергия электронного пучка для большинства этих применений лежит в диапазоне 0,7 - 1,5 МэВ. Следовательно для достижения необходимой мощности требуется выводить в атмосферу электронный пучок с током в сотни мА при относительно невысокой плотности тока, т.е. необходимо увеличивать площадь выпускного окна. Применение опорных решеток в указанном диапазоне энергий нерационально, т.к. их прозрачность составляет $80 \div 90 \%$. В случае использования "обычного" окна, его ширина определяется механической прочностью фольги и не может превышать $7 \div 10$ см. Поэтому и было решено создать новое выпускное устройство с двумя выпускными фольгами. Что позволило увеличить площадь выпускного окна вдвое без существенного изменения габаритов всего устройства.

Новое выпускное устройство (Рис.10) разрабатывалось на основе существующей конструкции с длиной выпускного окна 1600 мм. В нем используются две фольги, расположенные параллельно. Примерная траектория движения пучка показана на Рис.10в.. Сканирование пучка вдоль и поперек окон осуществляется с помощью стандартных отклоняющих магнитов с отношением частот сканирова-

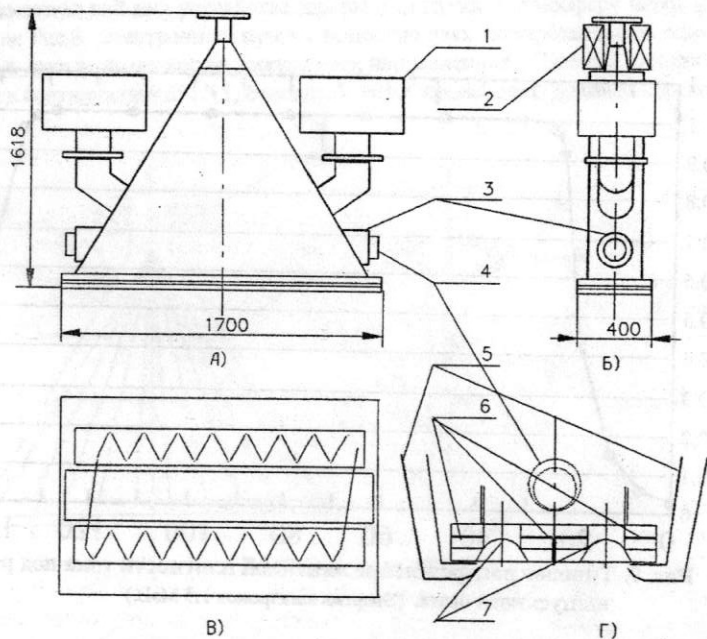


Рис.10 Двухоконное выпускное устройство

1 - магниторазрядные насосы, 2 - катушки и сердечники системы развертки пучка, 3 - фланец защитного цилиндра, 4 - защитный цилиндр, 5-обдув фольги, 6-рамка крепления фольги, 7-выпускные фольги.

ния 15/251. Пучок перебрасывается из одного окна в другое с помощью переключающего магнита. Моменты переброса пучка синхронизированы с частотой сканирования вдоль окна таким образом, что изменение полярности тока в переключающем магните осуществляется при достижении максимального отклонения пучка (на торцах окна). Для защиты элементов крепления фольги и ее уплотнений от попадания прямого пучка в моменты переброса установлен водоохлаждаемый цилиндр (Рис.19г)), который одновременно является элементом жесткости конструкции. Для улучшения вакуума установлено два дополнительных магниторазрядных насосов. Они производят откачку непосредственно из выпускного устройства.

Диафрагма на входе в выпускное устройство является элементом вакуумного сопротивления. В результате образовалась простейшая система дифференциальной откачки и вакуум в ускорительной трубке при работе с пучком в $2 \div 3$ раза лучше, чем в объеме выпускного устройства. При токе пучка 200 мА и энергии 0,8 МэВ вакуум в ускорительной трубке составляет $1-2 \cdot 10^{-4}$ Па. Таким образом большой ток пучка не оказывает влияния на вакуумные условия ускорительной трубки.

В процессе создания и наладки выпускного устройства требовалось решить две главные проблемы:

- обеспечить достаточно короткое время переброса пучка из одного окна в другое;
- скорректировать неравномерность поперечного отклонения пучка вдоль поверхности фольги, а также влиянием краевой фокусировки магнита продольного отклонения, т.е. компенсировать искажения раstra типа "сабля".

Минимальное время переброса пучка определяется толщиной стенок выпускного устройства, т.к. переключающий магнит установлен на внешней стороне выпускного устройства, и индуктивностью катушки переключающего магнита. При толщине стенок раstra из нержавеющей стали равной 3 мм минимальное время изменения полярности поля переключающего магнита около 0,25 мс, что обеспечивает потери пучка на уровне 3 %.

Коррекция искажений раstra осуществляется путем задания необходимой формы тока в катушках переключающего магнита. Источник питания переключающего магнита управляется от ЭВМ с помощью специальной схемы на основе программируемых ЦАП, выполненных в стандарте КАМАК. Управление системой переброса пучка полностью автоматизировано и осуществляется от штатной ЭВМ в рамках существующей управляющей программы ускорителя.

На данном устройстве выведен в атмосферу электронный пучок с током 200 мА при энергиях $750 \div 800$ кэВ. Проведены стендовые испытания устройства. Планируется длительная эксплуатация устройства на опытно-промышленной установке.

Устройства для вывода в атмосферу сфокусированного пучка электронов

При выводе электронного пучка в атмосферу через фольгу максимальная плотность тока не превышает 100 мкА/см^2 . Однако целый ряд пучковых техно-

логий требуют больших плотностей тока. Для этого разработаны устройства для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка. Плотность тока электронного пучка на выходе из этих устройств может достигать 10 А/см^2 , а плотность мощности - 10 МВт/см^2 . Пучок выводится через систему отверстий в диафрагмах. Отверстия прожигаются самим пучком и их диаметр лежит в пределах 1 - 2 мм. Рабочий вакуум в ускорительной трубке обеспечивается непрерывно работающими насосами системы дифференциальной откачки. Разработаны 2 варианта ускорителей с подобным выпускным устройством.

В первом пучок фокусируется двумя магнитными линзами. Этот вариант используется в ускорителе ЭЛВ-6 с максимальной мощностью 100 кВт при энергии 1.5 МэВ. Схематически выпускное устройство показано на рис.11. Ниже мы кратко поясним суть его работы. Электронный пучок после ускорительной трубки фокусируется магнитной линзой. В кроссовере линзы расположена диафрагма. Далее, рас-

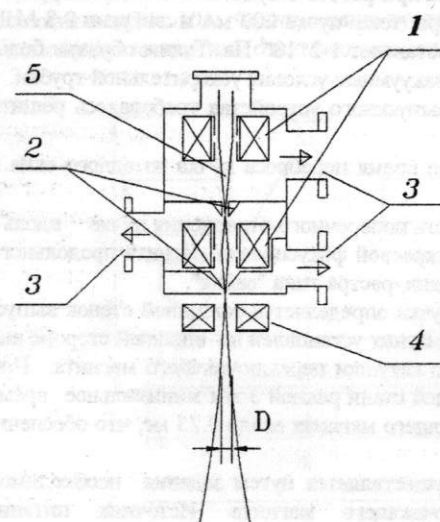


Рис.11 Схематический чертеж выпускного устройства:

1- магнитные линзы, 2-диафрагмы, 3-вакуумопроводы, 4-магниты сканирования, 5-электронный пучок; D-примерный вид огибающей пучка.

ширившись, пучок попадает во вторую линзу, с меньшим фокусным расстоянием. В кроссовере этой линзы расположены две диафрагмы. Газ, натекающий сквозь отверстия в диафрагмах, эвакуируется вакуумными насосами. Максимальная величина выводимого тока пучка ограничивается пульсациями ускоряющего напряжения, которые приводят к увеличению

отверстий в диафрагмах и допустимы на уровне 2-3 %. Описываемым устройством для вывода сфокусированного электронного пучка могут быть укомплектованы ускорители типа ЭЛВ-2, ЭЛВ-3, ЭЛВ-4 и ЭЛВ-6.

Для экспериментов, где не требуются максимально высокие плотности мощности, устройство оборудовано электромагнитами сканирования в двух перпендикулярных направлениях, при этом пучок отклоняется непосредственно в воздухе.

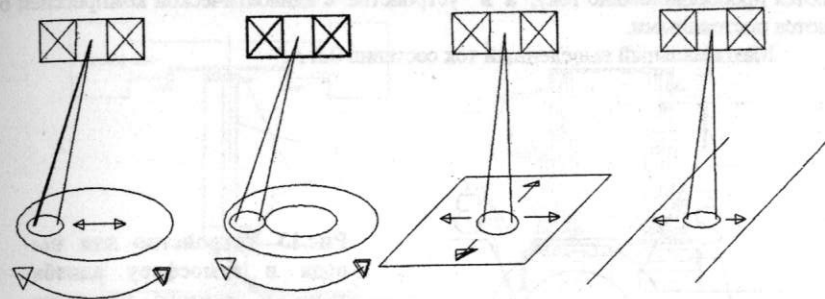


Рис.12 Возможные конфигурации полей облучения.

Система сканирования также позволяет обеспечивать необходимую конфигурацию дозного поля (Рис.12) в соответствии с требованиями технологии

Другой способ уменьшения диаметра пучка в выходных диафрагмах заключается в компрессии пучка адиабатически нарастающим продольным магнитным полем. Этот метод использован в ускорителе "Факел" мощностью 500 кВт. Основное преимущество адиабатической компрессии - малая чувствительность размера пучка к изменениям энергии электронов, что особенно важно при создании ускорителей мощностью сотни киловатт, где проблема пульсаций и нестабильностей ускоряющего напряжения достаточно актуальна. Ускорительная трубка и выпускное устройство расположены на одной оси, а магнитное поле плавно нарастает от 100 Гс на катоду до 10000 Гс в районе выходных диафрагм. При этом размер пучка уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из величины магнитного поля. Продольное магнитное поле создается системой соленоидов и катушек. Для увеличения поля непосредственно в районе выходных диафрагм применяется стальной концентратор. Схематически выпускное устройство данного типа показано на Рис.13. Мощность, потребляемая магнитной системой - 50 кВт. Вакуумная система состоит из диафрагм и трубок повышенного вакуумного сопротивления. Она встроена внутрь магнитной системы.

На Рис.14 показаны раздельно магнитная и вакуумная системы ускорителя, оборудованного выпускным устройством с адиабатической компрессией пучка электронов.

На первый взгляд кажется, что эффективность описываемого выпускного устройства ниже по сравнению с устройством, в котором пучок выводится в атмосферу через фольгу. Однако потери энергии электронов в 50 мкм Ti фольге составляют 35 кВ, кроме того небольшая часть тока пучка (1-2%) попадает на стенки выпускного устройства. Это приводит к тому, что, если бы мы стали выводить пучок с током 1 А в атмосферу через фольгу, то потери мощности пучка составили бы величину, близкую к 50 кВт. Т.е. уже при токе 1 А эффективность устройства с адиабатической компрессией пучка не ниже, чем у фольгового выпускного устройства. С увеличением тока пучка потери при выводе через фольгу увеличи-

ваются пропорционально току, а в устройстве с адиабатической компрессией остаются постоянными.

Максимальный выведенный ток составил 0.8 А.

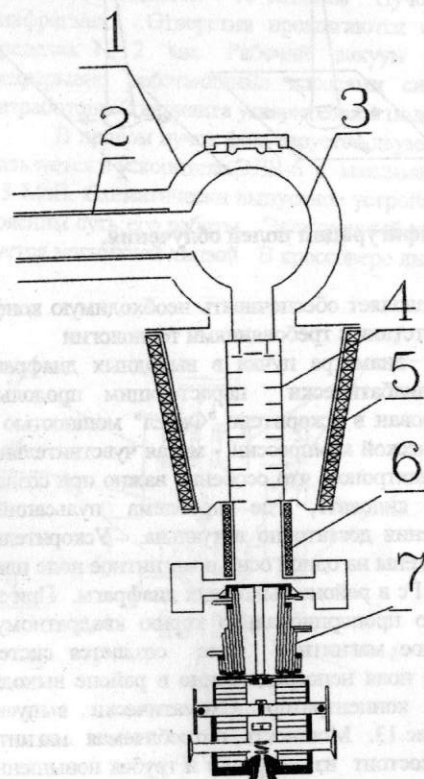


Рис.13 Устройство для вывода в атмосферу адиабатически сжатого интенсивного электронного пучка:

- 1- котел,
- 2- высоковольтный газовый фидер, соединяющий устройство с источником ускоряющего напряжения,
- 3-высоковольтный электрод, внутри которого расположены элементы системы питания инжектора,
- 4-ускорительная трубка,
- 5,6- соленоиды, создающие нарастающее продольное магнитное поле,
- 7- катушки магнитной системы с встроенной внутрь системой дифференциальной откачки.

СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО И ДВУХСТОРОННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

Для расширения технологических возможностей ускорителей разработаны и изготавливаются системы двустороннего и кольцевого облучения, обеспечивающие эффективное использование пучка, выведенного в атмосферу через фольгу, для облучения кабелей или труб диаметром до 60 мм, а также двустороннее облучение лент шириной до 300 мм. Электроны, выведенные через фольгу, под действием поворотных магнитов изменяют направление своего движения и производят всестороннее облучение объекта, как это изображено на Рис.15.

Аналогично работает и устройство для двустороннего облучения. Системы эффективно работают при энергии электронов выше 1.2 МэВ. При низких энергиях они также работоспособны, однако снижается коэффициент использования пучка из-за рассеяния электронов в фольге и воздухе.

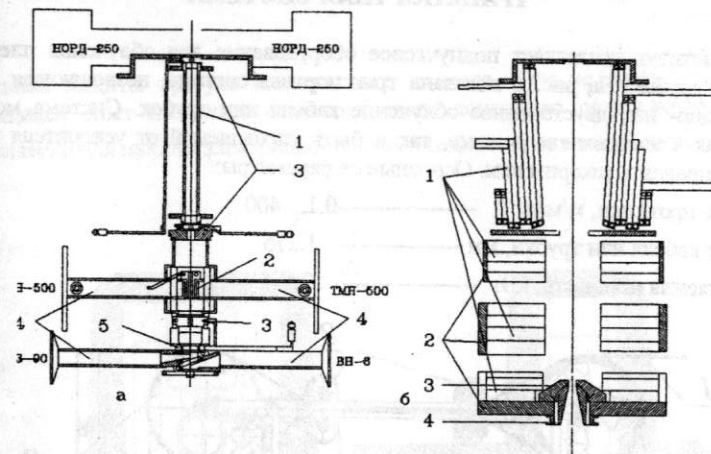


Рис.14 Выпускное устройство с адиабатической компрессией пучка.

- а) вакуумная система устройства (1,2 -трубки повышенного вакуумного сопротивления, 3,5- диафрагмы, 4 - вакуумопроводы).
- б) магнитная система устройства (1 - катушки, 2- магнитопроводы, 3- концентратор, 4- охлаждаемый экран).

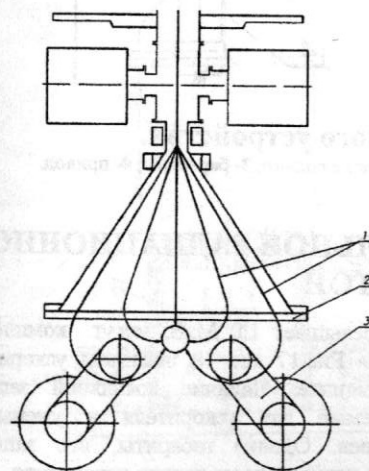


Рис. 15. Система кольцевого облучения.

- 1 - траектории электронов; 2 - выпускное окно; 3 - поворотные магниты.

Системы поставляется как дополнительное оборудование к типовому ускорителю и легко устанавливаются и снимаются при смене технологии.

ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА

Институт поставляет подпучковое оборудование для облучения пленки, кабеля или трубок. На рис.16 показана транспортная система, позволяющая производить одно- или двустороннее облучение кабеля или трубок. Система может работать как в автономном режиме, так и быть управляемой от ускорителя или, наоборот, управлять ускорителем. Основные ее параметры:

- скорость протяжки, м/мин ————— 0.1...400
- диаметр кабеля или трубки, мм ————— 1...15
- потребляемая мощность, кВт ————— 2,

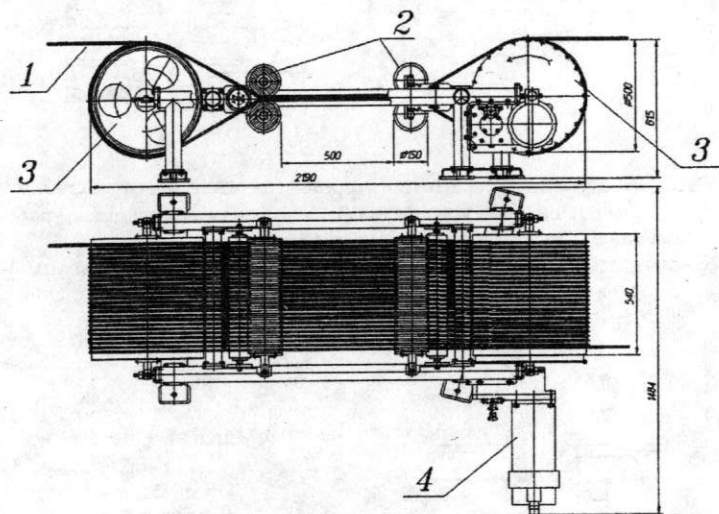


Рис.16. Общий вид транспортного устройства.

1- облучаемый объект; 2- направляющие ролики; 3- барабаны; 4- привод.

УСКОРИТЕЛИ С ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ

Ускорители, энергия которых не превышает 1.0 МэВ, могут комплектоваться местной радиационной защитой. На Рис.17 and 18 показаны ускорители ЭЛВ-мини и ЭЛВ-0.5 в локальной, й защите. Наличие локальной защиты естественно сокращает площади, требуемые для ускорителя и уменьшает капитальные затраты в большинстве случаев. Однако габариты, вес защиты, особенности ее конструкции определяются размерами не только ускорителя, но и подпучкового оборудования. Поэтому вопрос о целесообразности применения

локальной защиты требует комплексного подхода. Тем не менее отметим, что имеющийся опыт позволяет сконструировать локальную радиационную защиту практически для любого электронно-лучевого технологического процесса.

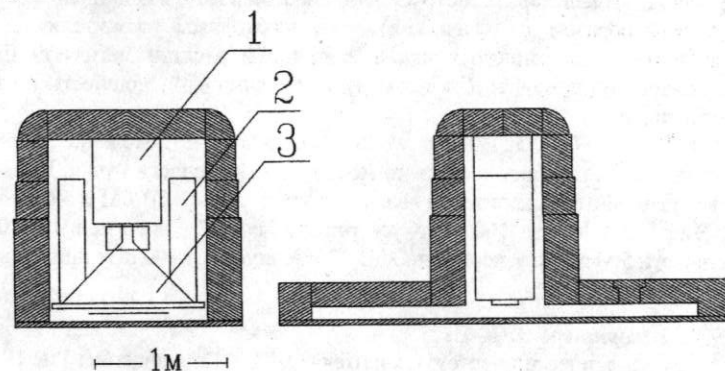


Рис. 17. Ускоритель ЭЛВ-мини в локальной защите

1- ускоритель, 2- вакуумные насосы, 3- выпускное устройство.

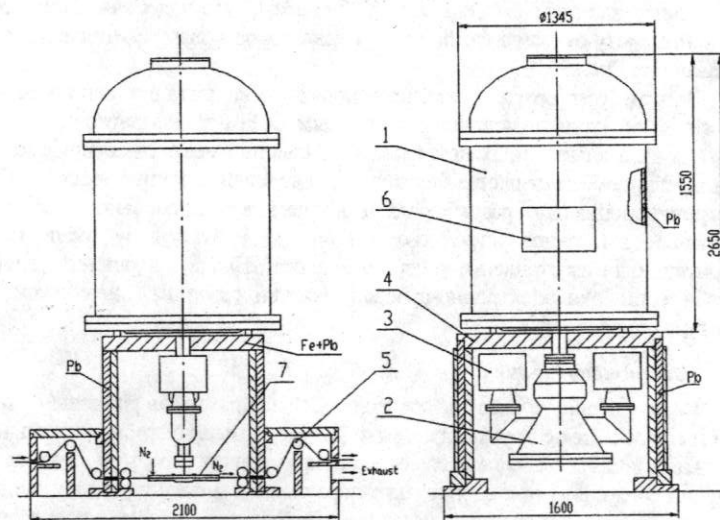


Рис.18. Ускоритель ЭЛВ-0.5 в локальной радиационной защите

1- сосуд; 2- выпускное устройство; 3- вакуумные насосы; 4- элементы защиты; 5 - конвейер; 6 - ввод кабелей управления и питания; 7- азотная камера (для тех процессов, где требуется облучение в инертной среде).

УСКОРИТЕЛИ С МОЩНОСТЬЮ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА В СОТНИ КИЛОВАТТ

Существующие ускорители имеют мощность главным образом до 100 кВт и не могут удовлетворить потребность энергоемких радиационных технологий (главным образом экологических), где необходимы ускорители с суммарной мощностью электронного пучка в единицы и десятки мегаватт. Для создания подобных комплексов требуются модули с единичной мощностью, как минимум, сотни киловатт.

В ИЯФ СО РАН разрабатывается новое поколение высоковольтных ускорителей, имеющих требуемую мощность выведенного пучка. Представителями нового семейства ускорителей являются: ускоритель ЭЛВ-6М с энергией 0.75 - 1.0 МэВ при мощности 160 кВт, ускоритель "Факел" с энергией 0.5 - 0.8 МэВ при мощности 500 кВт и ускоритель ЭЛВ-12 с мощностью 400 кВт при энергии 0.6 - 1.0 МэВ.

Ускоритель ЭЛВ-6М

Схематический чертеж ускорителя ЭЛВ-6М приведен на Рис.19а. Конструктивно он напоминает ускоритель ЭЛВ-6, в котором две выпрямительные колонны работают параллельно на общую нагрузку. Колонны расположены вертикально: одна над другой. Ускорительная трубка находится в нижней колонне. Каждая из колонн состоит из 38 выпрямительных секций, соединенных последовательно-параллельно, как показано на Рис.18б. Отметим, что подобная схема соединений допускает работу без фильтрующих конденсаторов в выпрямительной секции, что и показано на Рис.19б.

В этом ускорителе применена новая схема питания первичных обмоток ускорителя: обмотки подключены к разным фазам трехфазного преобразователя частоты и выходные напряжения каждой из колонн имеют сдвиг по фазе. Это дает дополнительное сглаживание пульсаций выходного напряжения. Для этого ускорителя специально разработано и на нем же опробовано описанное выше двухколонное выпускное устройство для вывода в атмосферу токов до 200 мА. Ускоритель был изготовлен и успешно испытан. После завершения строительства опытной установки электронно-лучевой очистки газов на Славянской ГРЭС он будет туда отправлен.

Ускоритель "Факел"

В ускорителе "Факел" высоковольтный выпрямитель размещен в отдельном котле и соединяется с трубкой газовым фидером. Выпрямитель состоит из 2-х параллельных колонн с выводом высокого напряжения посередине. Секции в каждой из колонн соединены последовательно-параллельно и фильтрующие конденсаторы в них отсутствуют. Первичная обмотка с центральным магнитопроводом расположена внутри колонны высоковольтного выпрямителя. Рабочая частота напряжения питания ускорителя - 1000 Гц и питается он от преобразователя ППЧВ-500. Схематически ускоритель показан на Рис.20. Он был оборудован устройством для вывода в атмосферу адиабатически сжатого электронного пучка, которое было описано выше.

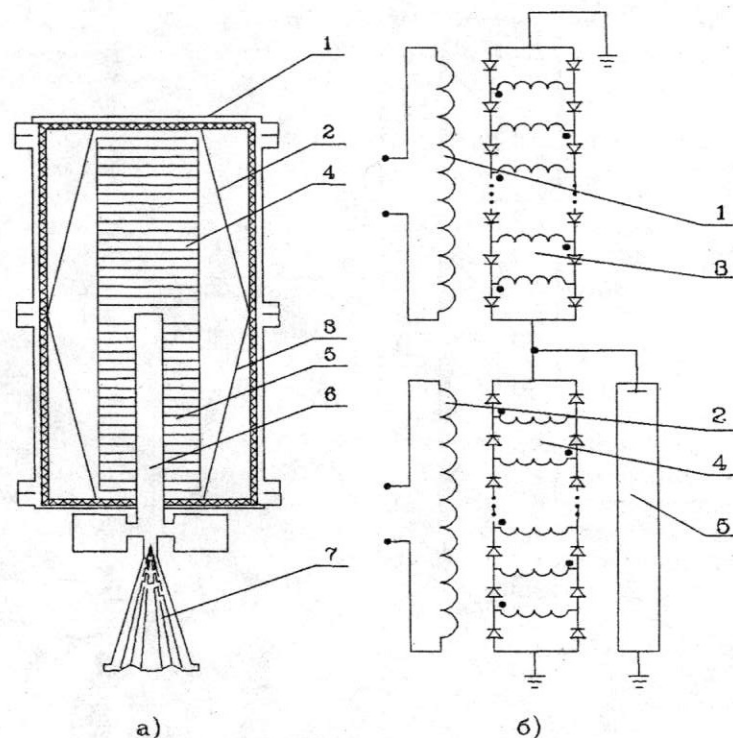


Рис.19. Ускоритель ЭЛВ-6М

а) схематический чертеж ускорителя;

б) электрическая схема ускорителя

1 - котел; 2,3- первичные обмотки; 4,5 - колонны выпрямительных секций; 6 - ускорительная трубка; 7 - выпускное устройство.

Максимальные параметры полученные на этом ускорителе: ток пучка - 0.8 А при энергии 0.5 МэВ, энергия - 0.8 МэВ при токе 0.5 А, мощность пучка - 500 кВт (0,7 МэВ; 0,7А).

Ускоритель ЭЛВ-12

Ускоритель ЭЛВ-12 объединяет в себе конструктивные решения, проверенные в процессе разработки предыдущих ускорителей. Он показан на Рис.21. Высоковольтный источник питания, состоящий из 2 параллельных колонн, расположен в отдельном котле и соединяется газовыми фидерами с 2-мя ускоряющими модулями.

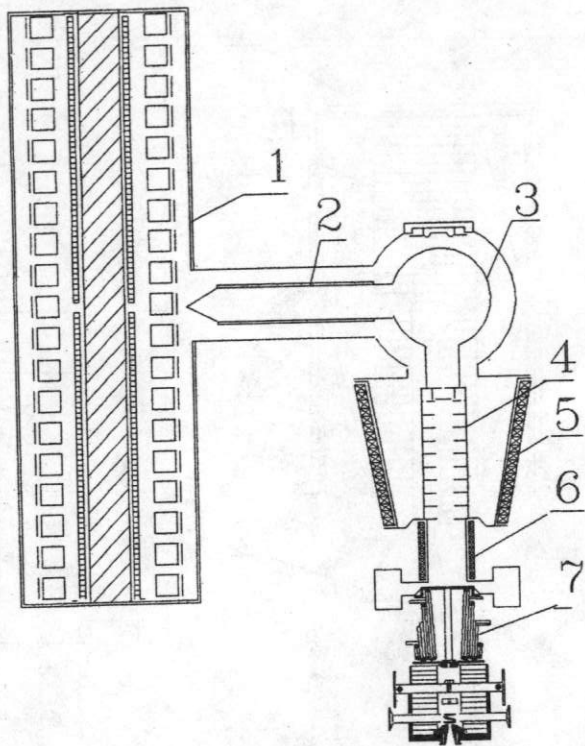


Рис. 20. Ускоритель «Факел».

1 - источник ускоряющего напряжения, 2 - газовый фидер, 3 - система управления-инжектором, 4 - ускорительная трубка, 5, 6, 7 - элементы выпускного устройства с адиабатической компрессией пучка.

Выпрямительные секции в колоннах соединены последовательно-параллельно и не содержат фильтрующих конденсаторов, так как выходная емкость, обусловленная наличием газовых фидеров достаточно велика, а рабочая частота напряжения питания повышена до 1000 Гц. Для этого ускорителя разработаны новые катушки вторичной обмотки. Они имеют больший диаметр и витковое напряжение увеличено до 20 В/виток. Питание планируется от тиристорного преобразователя частоты.

Ускоряющий модуль представляет собой ускорительную трубку, расположенную в отдельном котле, и состыкованное с ней двухоконное выпускное устройство. Кроме того, одна трубка может быть расположена и внутри котла ускорителя.

Ток пучка в каждом из модулей регулируется независимо, что позволяет в широких пределах регулировать распределение мощности поглощенной дозы. Максимальная величина тока отдельного модуля - 200 мА, при этом максимальный полный ток ускорителя - 400 мА. В принципе, проектируемый выпрямитель, если будет потребность, сможет обеспечивать мощность до 1 МВт, при этом число излучателей будет увеличено.

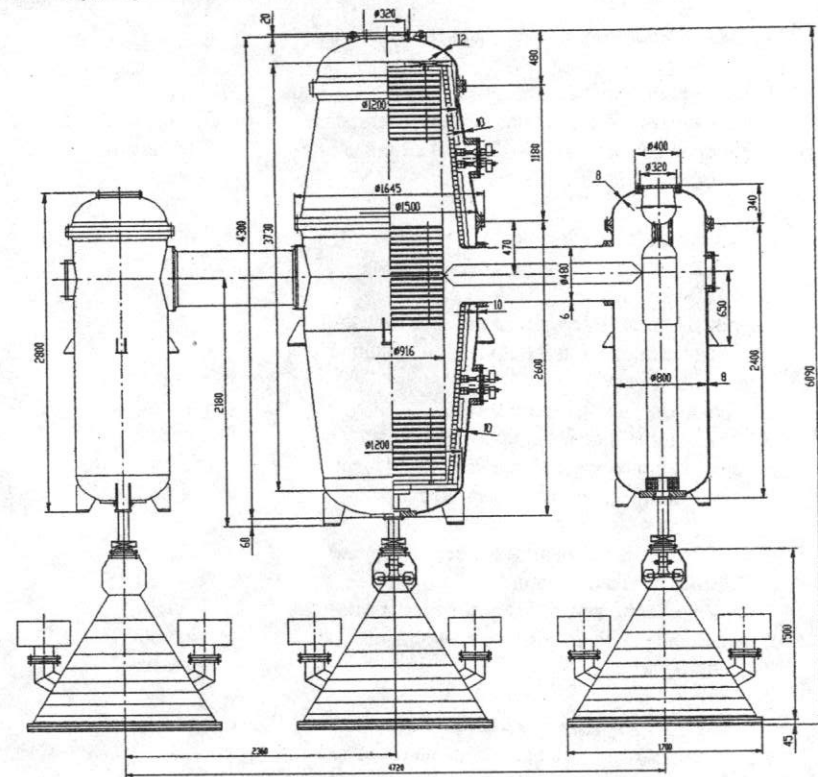


Рис. 21. Общий вид ускорителя ЭЛВ-12 (версия с тремя ускорительными трубками)

Основное назначение ускорителя ЭЛВ-12 - работа в установках электронно-лучевой очистки газов и сточных вод. В настоящее время ускоритель находится в изготовлении.

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ

Основные применения ускорителей ЭЛВ приведены в Табл.2

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ

Основные применения ускорителей ЭЛВ приведены в Табл.2

Таблица 2

Тип технологии	Страна	Число ускорителей
----------------	--------	-------------------

Модифицирование полимерных изделий

- | | | |
|---|---|-----------------------|
| 1. Модифицирование полиэтиленовой изоляции для производства термостойких проводов и кабелей сечением 0.5 - 120 мм ² с производительностью до 200 м/мин | Россия
Белоруссия
Украина
Чехия
Китай | 5
5
5
1
9 |
| 2. Производство термоусаживаемых трубок, пленок и лент с производительностью до 1000 кг/час | Россия
Молдавия
Китай | 3
2
2 |
| 3. Производство искусственных кож и резинотехнических изделий с производительностью до 1000 м ² /час | Россия | 4 |
| 4. Производство препрега и геля | Россия | 2 |
| 5. Отверждение лакокрасочных покрытий на различных основах для стройиндустрии с производительностью до 500 м ² /час | Россия
Узбекистан
Казахстан | 2
1
1 |

Технологии для экологических целей

- | | | |
|--|----------------------------|-------------|
| 6. Обработка сточных вод | Россия | 4 |
| 7. Очистка отходящих газов тепловых станций от окислов серы и азота производительностью до 20000 м ³ /час | Россия
Польша
Япония | 1
2
2 |

Другие применения

- | | | |
|---|--|------------------|
| 8. Поверхностная наплавка и закалка металлов, производство катализатора для синтеза аммиака, производство спецкерамики, развитие высокотемпературных химических технологий, | Россия | 5 |
| 9. Дезинсекция зерна с производительностью до 200 т/час | Россия
Украина | 1
2 |
| 10. В исследовательских целях | Россия
Болгария
Германия
Ю. Корея | 5
1
1
1 |

Всего более 60 ускорителей работают в технологических линиях и исследовательских центрах разных стран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наработанный опыт проектирования и эксплуатации ускорителей серии ЭЛВ позволяет предложить покупателю ускорители электронов, не только не уступающие по своим параметрам лучшим мировым образцам, но и во многом превосходящие их.

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ИЛУ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, В.А. Горбунов,
М. В. Коробейников, С.А. Максимов, В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов,
В.О. Ткаченко, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович.
(Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В настоящей работе представлены промышленные ускорители электронов серии ИЛУ, даны их основные параметры. Описаны устройство и принцип действия ускорителей и их основных узлов. Приведены системы выпуска электронного пучка и набор вспомогательного оборудования для технологических процессов обработки проводов, кабелей и полимерных труб. Даны краткие характеристики некоторых новых технологических разработок в области высокотемпературных процессов и в технологии радиационной иммобилизации биологически активных веществ, показаны пути их развития.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Начиная с 1970 года, в Институте ядерной физики СО РАН разрабатываются и поставляются в промышленность импульсные линейные ускорители (ИЛУ), предназначенные для широкого применения в различных технологических процессах и рассчитанные на длительную непрерывную и круглосуточную работу в промышленных условиях. В отличие от широко распространенных высоковольтных ускорителей, имеющих непрерывный ток пучка, импульсный характер пучка позволяет легко адаптировать ИЛУ к технологическим процессам, требующим создания зоны облучения сложной конфигурации. Наиболее ярким примером таких процессов является облучение полимерной изоляции кабелей и термоусаживаемых трубок, где применение четырехстороннего облучения позволяет без повышения энергии электронов резко повысить производительность процесса, улучшить качество продукции и расширить номенклатуру обрабатываемых изделий.

В Табл. 1 приведены основные параметры производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ, перекрывающие диапазон энергий от 0,5 до 5 МэВ с максимальной мощностью пучка до 50 кВт.

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

В состав ускорителя входят ускоряющая система с выпускным устройством, вакуумной системой и ВЧ - генератором, импульсный источник питания и стойка управления. Ускоряющая система размещается внутри биологической защиты, все остальное - в незащищенных помещениях. На рис. 1 приведены габариты основных узлов различных моделей ускорителей.

Базовой моделью является модель ИЛУ-6. При скромных габаритах этот ускоритель обладает достаточно высокими параметрами и может применяться для широкого спектра технологических процессов. Для его размещения достаточно за-

Таблица 1

Параметр	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-6М	ИЛУ-10	ИЛУ-10М
Энергия электронов, МэВ	0,6-1,0	1,2-2,5	1.2-2,5	2,5-5,0	2,5-5,0
Мощность пучка, макс, кВт	30	20	50	50	25
Средний ток (макс), мА	30	20	25	15	10
Потр. мощность, кВт	100	100	150	200	120
Вес, т. Ускоритель	0,6	2.2	2,2	2,9	2,5
Местная защита	76	-	-	-	-

щищенного помещения с внутренними размерами 3 X 4 X 5 м. При толщине стены помещения 1,5 м объем бетона составляет около 180 м³. Эта модель получила широкое применение как в нашей стране, так и за рубежом.

Дальнейшим развитием стала модель ИЛУ-8, предназначенная главным образом для обработки кабелей и трубок. Этот ускоритель не требует строительства специального защищенного помещения и может быть размещен в обычном производственном цехе. Он размещается в местной биологической защите. Местная защита ускорителя выполнена в виде коробки из стальных пластин. Внутри коробка разделена на две части. В верхней части размещен ВЧ - резонатор с магнитоэлектрическими насосами и форвакуумная система. В нижней части находятся выпускное устройство, воздухопроводы вентиляционной системы и технологическое оборудование. В заднюю стенку смонтированы каналы-лабиринты для ввода кабелей, воздуха и

воды. Сдвигаемая передняя стенка служит дверью защитной коробки. Толщина радиационной защиты в нижней части 330 мм и в верхней -240 мм. Общий вес защиты 76 тонн. Коэффициент ослабления тормозного излучения при энергии электронов 1.0 МэВ не менее $5 \cdot 10^7$.

Модель ИЛУ-10 является новой разработкой и предназначена в основном для процессов, требующих повышенной энергии электронов. Габариты этого ускорителя не намного превышают габариты ИЛУ-6. Для осуществления процессов, требующих повышенной мощности, на ускорителе устанавливаются два ВЧ-генератора.

Опыт разработки и эксплуатации импульсных высокочастотных ускорителей типа ИЛУ (ИЛУ-6, ИЛУ-8, ИЛУ-10) показал, что однорезонаторные ускорители с одним ускоряющим зазором могут быть эффективно использованы для ускорения электронов в диапазоне энергий 0,5÷5,0 МэВ при мощности электронного пучка 20÷50 кВт. Дальнейшее повышение энергии электронного пучка требует перехода на использование многозазорных ускоряющих структур, например, цепочек связанных резонаторов.

Наличие базовой модели резонатора ускорителя ИЛУ-8 на энергию 1 МэВ, готового высокочастотного генератора и системы его питания и управления с учетом преимущества конструкции и унификации комплектующих узлов позволило разработать ускоритель ИЛУ-11 для промышленного применения на энергию электронов 4÷5 МэВ при сохранении относительной простоты изготовления и наладки.

На рис. 2 изображен общий вид этого ускорителя. Ускорительная секция, выполненная из двух связанных симметричных тороидальных резонаторов (1), помещена внутрь вакуумного стального бака (2). Связь между резонаторами осуществляется с помощью коаксиальной линии (3) длиной $\lambda/2$.

Основные параметры ускорителя ИЛУ-11:

1. Максимальная энергия - 5 МэВ;
2. Максимальная средняя мощность пучка электронов
 - 20 кВт (с 1 генератором)
 - 50 кВт (с 2 генераторами);
3. Средний ток пучка - 4 или 10 мА;
4. Потребляемая мощность
 - 100 кВт (с 1 генератором)
 - 150 кВт (с 2 генераторами)
5. Частота повторения импульсов - 0.5-50 Гц

При последовательном соединении двух аналогичных секций посредством соответствующего устройства связи имеется возможность построения ускорителя электронов на энергию 8 - 10 МэВ.

В большинстве современных ускорителей применяется принцип высоковольтного ускорения, т.е. энергия электронов соответствует напряжению, создаваемому выпрямителем. Промышленные ускорители типа ИЛУ являются исключением из этого правила. В них применен принцип ускорения электронов в зазоре высокочастотного резонатора. Такой ускоритель не содержит деталей, потенциал которых относительно корпуса сравним с ускоряющим напряжением. Таким образом, исключено применение сложных высоковольтных узлов (ускоряющие тру-

бки, секции выпрямителей и т.д.), выходящих из строя при пробоях. Нет также необходимости в применении изолирующего газа и сосудов под давлением.

Использование принципа высокочастотного ускорения позволило создать относительно простой по конструкции ускоритель со скромными

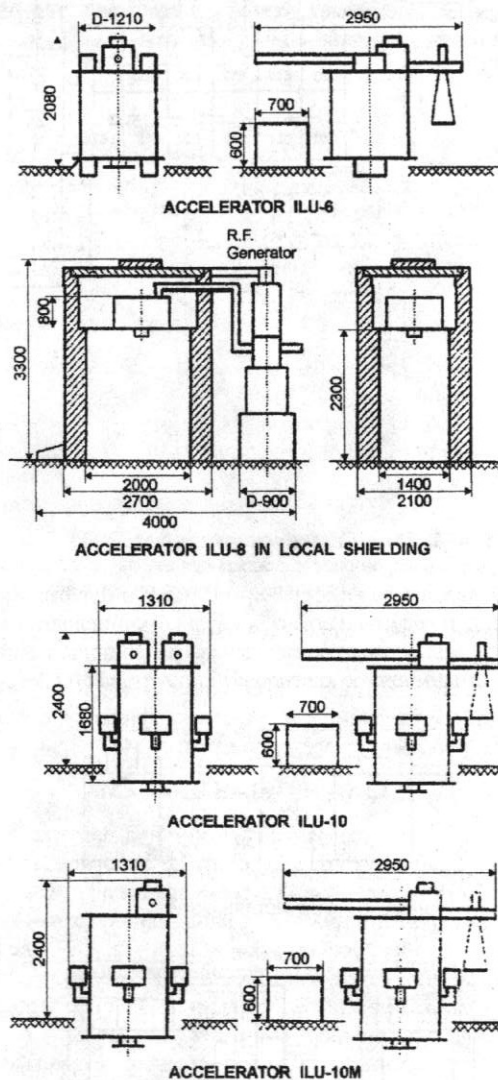


Рис. 1. Габариты основных узлов ускорителей типа ИЛУ

габаритами и весом. Это позволяет размещать его в зале меньших размеров, чем залы для высоковольтных ускорителей с теми же параметрами.

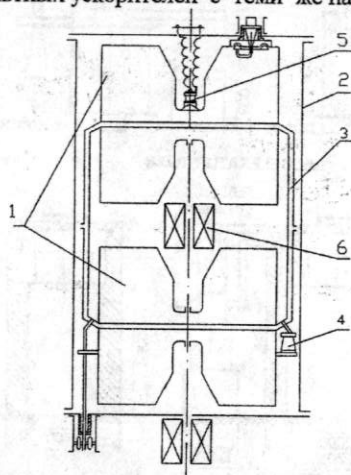


Рис. 2. Общий вид ускорителя ИЛУ-11.

1 - два связанных симметричных тороидальных резонатора; 2 - вакуумный бак; 3 - коаксиальная линия; 4 - опорный изолятор; 5 - электронная пушка; 6 - магнитная линза.

Импульсность пучка ускорителей типа ИЛУ дает возможность направлять его в различные каналы выпускного устройства без потерь. Следовательно, появляется возможность создания выпускных устройств, формирующих зону облучения в соответствии с формой облучаемого изделия, что позволяет повысить эффективность использования ускоренного пучка.

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

На Рис.3 приведена ускоряющая система ускорителя ИЛУ-6, на примере которой поясняется принцип действия ускорителя. Ускоряющая система состоит из медного тороидального резонатора 1, размещенного в вакуумном объеме 2. Резонатор состоит из верхней и нижней половины, на внутренних выступах которых установлены электроды, образующие ускоряющий зазор. В верхнем электроде выполнена управляющая стержневая сетка. На изоляторе, установленном на электроде, смонтирован катодный узел, образующий с сеткой инжектор электронов 5. Нижний электрод и инжектор образуют триодную ускоряющую систему. Управление током ускоренного пучка электронов осуществляется изменением величины положительного смещения на катоде относительно сетки.

Для подавления высокочастотного резонансного разряда в резонаторе его нижняя половина установлена на изоляторах и на нее через индуктивность 3 подано напряжение смещения, частично подавляющее этот разряд.

Внутри выступа нижней половины резонатора установлена аксиально-симметричная магнитная линза 13, формирующая пучок в канале ускорителя и

выпускном устройстве 6. Выпускное устройство подсоединяется к фланцу линзы через шибер и сифонный узел. Исполнение выпускного устройства варьируется в зависимости от технологического процесса.

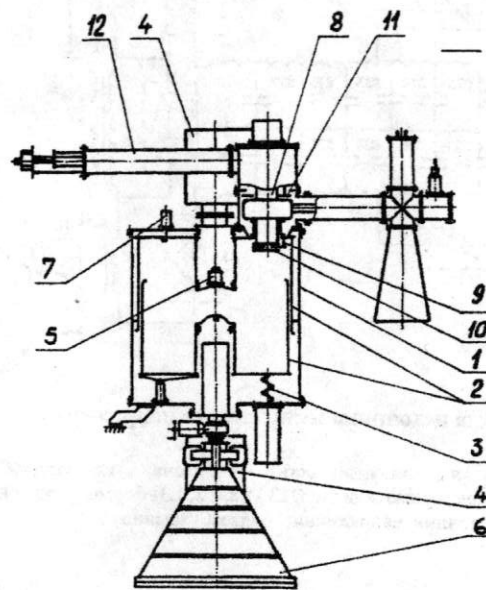


Рис. 3. Общий вид ускорителя ИЛУ-6.

1-вакуумный объем; 2-резонатор; 3-смещения нижней половины резонатора; 4-магниторазрядные насосы; 5-инжектор электронов; 6-выпускное устройство; 7- измерительная петля; 8-лампа генератора; 9-опора петли связи; 10-вакуумный конденсатор петли связи; 11-подвижная пластина конденсатора обратной связи; 12-катодный шлейф.

Однокаскадный генератор высокой частоты установлен непосредственно на вакуумном баке резонатора (модели ИЛУ-6, ИЛУ-10) или вблизи него

(модель ИЛУ-8) и связан с последним петлей связи. Генератор, собранный по схеме с общей сеткой, работает в режиме самовозбуждения на частоте связи, близкой к собственной частоте резонатора. В ускорителе ИЛУ-8 выходная мощность ВЧ генератора подается на петлю связи по коаксиальному фидеру, а сигнал обратной связи снимается с резонатора петлей обратной связи и заводится в генератор по кабелю.

Откачка вакуумного объема во время работы ускорителя производится высоковакуумными магниторазрядными насосами 4, размещенными непосредственно на объеме. Предварительная откачка воздуха после вскрытия этого объема осуществляется форвакуумным насосом, установленным вблизи ускоряющей системы.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

Импульсный источник питания унифицирован для всех моделей ИЛУ. Источник импульсного напряжения, питающий анод лампы ВЧ генератора, работает непосредственно от трехфазной сети напряжением 380/220 В без применения промежуточного трансформатора (см. рис.4). К выходу выпрямителя G1, собранного на тиристорах, подключена накопительная индуктивность L1, закорачиваемая при накоплении тока тиристорными ключами N1 и N2.

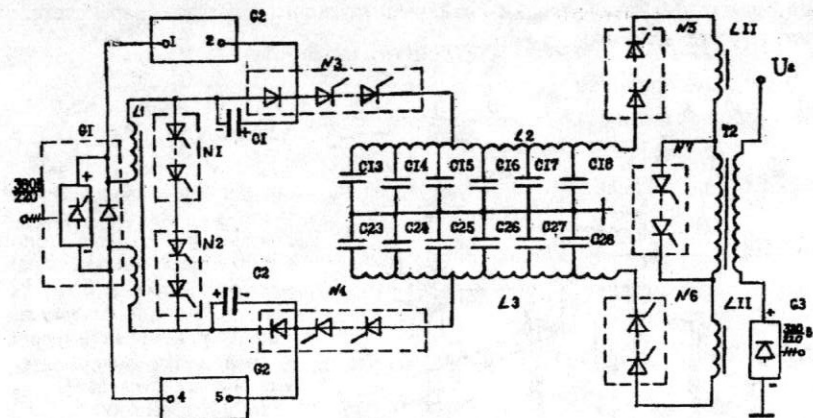


Рис.4. Упрощенная схема источника импульсного напряжения.

G1-выпрямитель, L1-накопительная индуктивность, G2-схема перезаряда, C1, C2-конденсаторы перезаряда, N1 - N7-тиристорные ключи, C13 - 28, L2, L3- формирующая линия, T2-импульсный трансформатор, G3-источник напряжения подвозбуждения.

При включении тиристорных ключей N3 и N4 запираются ключи N1 и N2, накопление тока прекращается и вся энергия, накопленная в индуктивности L1, перебрасывается в конденсаторы формирующей линии (C13...C28, L2, L3), заряжая их до напряжения, определяемого величиной накопленной энергии. После прекращения заряда формирующей линии открываются тиристорные ключи N5 и N6, подключающие к линии первичную обмотку импульсного трансформатора T2. На нагрузке его вторичной обмотки (аноде лампы ВЧ генератора) формируется импульс напряжением до 30 кВ, длительностью 0.4 - 0.7 мс при токе нагрузки до 150 А. Задний фронт импульса формируется тиристорным ключом N7, закорачивающим первичную обмотку трансформатора. Частота повторения импульсов может изменяться от 2 до 50 Гц (при работе с пониженными амплитудами импульса до 100 Гц). Постоянное напряжение для подвозбуждения ВЧ генератора подается на анод лампы от источника G3 через вторичную обмотку импульсного трансформатора. Оно же используется для размагничивания сердечника этого трансформатора после высоковольтного импульса. Применение индуктивного накопителя позволило отказаться от высоковольтного выпрямителя, значительно снизить габариты источника и повысить его КПД.

СТОЙКА УПРАВЛЕНИЯ

Управление ускорителем осуществляется с помощью компьютера. На стойке управления размещены электронные блоки, управляющие узлами и системами ускорителя, и блок управления, связывающий эти блоки с компьютером.

Оператор вводит основные параметры технологического процесса в компьютер и включает питание и вспомогательные системы ускорителя. Дальнейшее управление работой ускорителя: начало и конец процесса облучения, поддержание параметров в заданных пределах, информирование оператора об условиях протекания процесса и выключение ускорителя в аварийных ситуациях осуществляется компьютером. Все параметры процесса могут быть выведены на экран компьютера в цифровой форме, основные параметры - в форме графиков текущего времени с изменением временного масштаба. Кроме того программой предусматривается осуществление периодической распечатки таблицы режимов работы ускорителя.

Основные параметры ускорителя и технологического процесса поддерживаются с точностью до 1%, что обеспечивает высокое качество обработки продукции.

Программное обеспечение компьютера позволяет легко адаптировать установку к широкому спектру технологических процессов и задавать программу изменения параметров во времени в случае надобности.

При выходе компьютера из строя возможен переход на ручное управление технологическим процессом путем простого переключения стойки в режим ручного управления. В этом режиме рабочие параметры ускорителя и технологического оборудования выводятся на цифровой индикатор и осциллограф.

Габариты стойки управления 1 X 1 X 2 м. К стойке прилагается приставка для размещения компьютера и осциллографа.

УСТРОЙСТВА ВЫПУСКА ПУЧКА

Использование для технологий импульсных ускорителей электронов позволяет создавать устройства выпуска пучка, формирующие зону многостороннего облучения объектов различной формы. Это дает возможность повысить эффективность использования пучка и в ряде случаев снизить энергию, необходимую для облучения либо расширить номенклатуру обрабатываемых изделий. Такова, например, ситуация при обработке кабелей. Облучение проводов кабелей и трубок должно производиться по меньшей мере с двух сторон. Двухстороннее облучение приемлемо для миниатюрных или плоских многожильных проводов, лент и т.д. Однако при двухстороннем облучении толстых кабелей и облучении труб неоднородность дозы по периметру получается слишком высокой. Более того, применение обычных облучателей с использованием линейной развертки пучка и перемоточного устройства, обеспечивающего двухстороннее облучение на одном уровне, не дает хороших результатов из-за вращения изделия вокруг его продольной оси при перемотке.

В тех случаях, когда, в связи с большой толщиной стенки трубы или с конфигурацией кабеля, описанная выше система двустороннего облучения не обеспечивает необходимой равномерности дозы, применяется система выпуска пучка для трехстороннего облучения при перематке изделия.

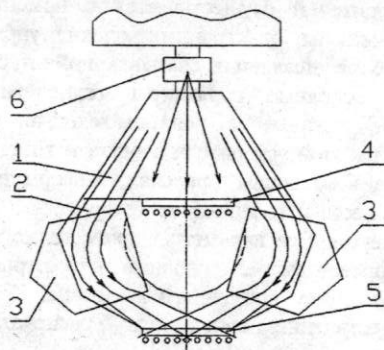


Рис. 5. Система выпуска пучка для трехстороннего облучения при перематке.

1 - стандартное устройство для выпуска электронного пучка в атмосферу с линейной разверткой; 2 - дополнительная вакуумная камера; 3 - магниты доворота пучка; 4 - верхнее окно для выпуска пучка; 5 - нижнее окно для выпуска пучка; 6 - магнит развертки пучка.

Система выпуска на рис.5 содержит стандартное выпускное устройство с "линейной" разверткой 1, к нижней части которого вместо выпускного окна подсоединена дополнительная вакуумная камера 2, на которой установлены поворотные магниты 3. Выпуск пучка осуществляется через два выпускных окна: верхнее 4 и нижнее 5.

Геометрия системы подобрана таким образом, что угол между плоскостью окна 5 и пучком (как правым, так и левым) близок к 30° .

Так как через верхнее выпускное окно облучается наружная часть "петли", а через нижнее - внутренняя, устройство обеспечивает трехстороннее облучение.

Удобной для радиационной обработки кабелей и труб является система облучения, в которой отсутствует изменение направления изгиба изделия при перематке, т.е. в которой изделие облучается на двух уровнях как минимум с двух сторон. Такая схема облучения реализуется с помощью устройства выпуска пучка, показанного на Рис.6. Пучок отклоняется на 45° последовательно на разных уровнях, что обеспечивает четырехстороннее облучение перематываемого под выпускными окнами изделия. Такая система выпуска достаточно универсальна и позволяет реализовать двух- или четырехстороннее облучение или линейную развертку пучка простым переключением режима работы разворачивающих магнитов.

Для специальных целей была разработана трехканальная система выпуска пучка с линейной разверткой его в каждом канале (Рис.7). С помощью этой системы обрабатывались изделия на трех отдельных линиях одновременно с различными режимами облучения.

Следующая система предназначена для использования с ускорителем ИЛУ-6 в установке для изготовления крупногабаритных емкостей (типа газгольдеров) из радиационно-отверждаемых компаундов. Ускоритель перемещает

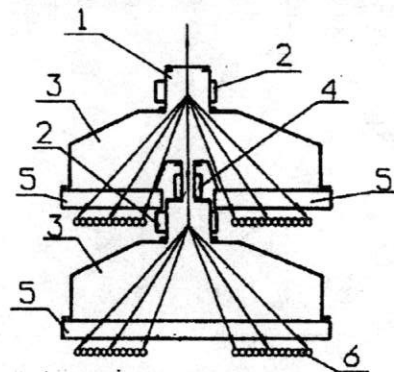


Рис.6. Устройство выпуска пучка для четырехстороннего облучения.

1-узел развертки; 2-сердечник магнита развертки; 3-вакуумная камера; 4- фокусирующая линза; 5-выпускные окна; 6-облучаемое изделие.

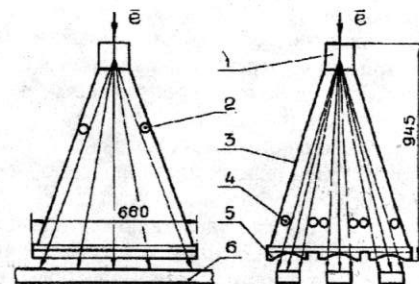


Рис.7. Трехканальное устройство выпуска пучка.

1-отклоняющая система; 2-датчики продольного положения пучка; 3-вакуумный объем; 4-датчики поперечного положения пучка; 5-выпускные окна; 6-облучаемый объект.

ся по двум координатам (вертикали и горизонтали) над вращающейся емкостью.

Система выпуска обеспечивает возможность облучения как цилиндрической части емкости, так и ее торцов эллиптической формы.

Выпуск (Рис. 8) состоит из плоской вакуумной камеры 1, нижняя часть которой перекрыта выпускными окнами 2, а в верхней расположены разворачивающий 3 и поворотный 4 магниты. Разворачивающий магнит аналогичен подобному магниту системы выпуска пучка с "линейной" разверткой. Поворотный магнит - "О"-образной формы.

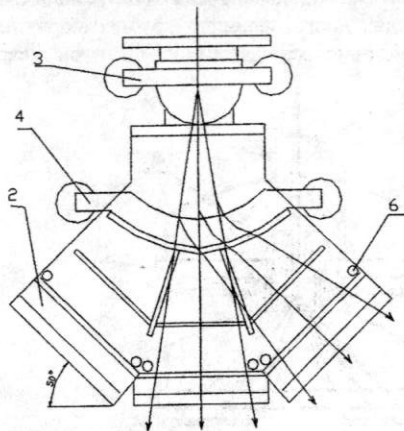


Рис. 8. Система выпуска с поворотом развернутого пучка.

1 - вакуумная камера; 2 - окно для выпуска пучка электронов в атмосферу;
3 - магнит развертки пучка; 4 - магнит доворота пучка; 5 - зонды положения пучка

Принцип работы системы следующий:

- при облучении цилиндрической части емкости пучок, развернутый магнитом 3, выпускается через центральное окно при отключенном поворотном магните, т. е. система аналогична выпуску с "линейной" разверткой;
- при облучении торцов емкости поворотным магнитом развернутый пучок частично или полностью переводится на одно из боковых окон в зависимости от угла наклона облучаемой части днища.

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

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Ускорители семейства ИЛУ нашли широкое применение в промышленных технологических процессах. Основная область применения - облучение кабелей, проводов и труб. В этой области они особенно эффективны т.к. реализуют процесс четырехстороннего облучения. Принцип реализации четырехстороннего облучения приведен на Рис.9. Для промышленной реализации этого процесса разработан ряд устройств для подпучковой транспортировки кабелей и труб с различными па-

раметрами - от самых тонких до изделий с минимальным радиусомгиба до 0,75 м и диаметром до 50 мм (Рис.10, Рис.11).

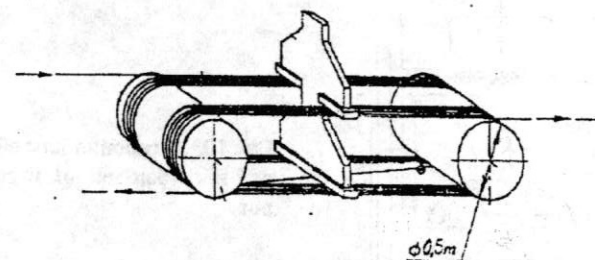


Рис.9. Схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля под четырьмя выпускными окнами.

Заказчикам поставляются облучательные установки, соответствующие номенклатуре их изделий.

Установка на базе ускорителя ИЛУ-8 с энергией электронов до 1 МэВ может обрабатывать кабели с толщиной изоляции до 2 мм и трубки с толщиной стенки до 2,5 мм. При двухстороннем облучении таких изделий требуется энергия до 2 МэВ. Производительность такой установки на большинстве изделий ограничивается возможностями существующих приемодаточных устройств. Так, например, на установке, используемой в Корее для облучения термоусаживаемых трубок, основная их часть облучается в два ручья параллельно со скоростью до 200 м/мин.

Установка может быть снабжена подпучковым транспортным устройством для облучения пленочных изделий.

Установка на базе ускорителя ИЛУ-6 с энергией электронов до 2,5 МэВ способна обрабатывать кабели с толщиной изоляции до 5 мм и полиэтиленовые трубы горячего водоснабжения, ламинированные алюминием.

В Китае такая установка используется для облучения 10 кВ кабеля при производительности до 100 м/мин.

Следующая область перспективного применения ускорителей семейства ИЛУ - стерилизация медицинских изделий. В Ижевске и Киеве работают установки на базе ускорителей ИЛУ-6 по стерилизации одноразовых шприцев. Производительность такой установки - до 100.000 шприцев в час. Модель ИЛУ-10 с энергией электронов до 4 МэВ позволяет значительно расширить номенклатуру стерилизуемых изделий.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В Институте ядерной физики на стенде ИЛУ совместно с другими организациями разработан ряд перспективных технологических процессов, которые могут найти широкое применение.

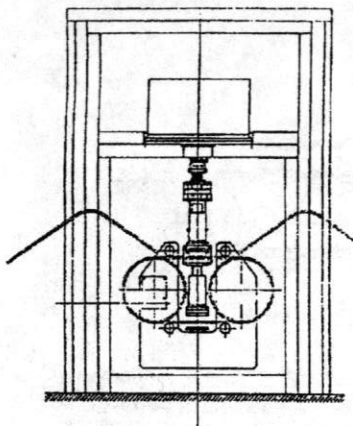


Рис.10. Установка для облучения кабелей и трубок малых и средних диаметров.

а. Высокотемпературные процессы.

Пучок электронов, выпущенный в воздух через фольгу, способен обеспечить плотность мощности до 400 Вт/см², что дает возможность нагрева обрабатываемого материала до 2000°С. При этом материал нагревается во всем объеме проникновения электронов, что практически исключает тепловую инерцию, неизбежную при других способах нагрева. Простота управления параметрами пучка позволяет осуществить любой режим нагрева, что гарантирует высокую точность и воспроизводимость процесса.

Эффект пучковой ионизации, добавляющийся к эффектам термической активации реакции, увеличивает скорость реакции и позволяет снизить температуру процесса. Таким образом, пучок выступает как нетрадиционный источник нагрева с одной стороны и как радиационный активатор реакции с другой.

Эта технология применяется, в частности, при производстве катализатора на основе оксида железа для синтеза аммиака, высокотемпературных стекол и керамик, высококачественных ферритных материалов, в процессах повышения твердости поверхности металлов и порошковых покрытиях стали и не ферритных материалов.

Большой интерес представляет обработка пучком электронов пассивных компонентов при производстве гибридных интегральных схем (ГИС). При ее использовании имеет место

- улучшение качества компонентов,
- увеличение плотности толсто пленочных элементов,
- уменьшение процента бракованных плат,
- использование паст на основе широко распространенных металлов взамен паст на основе редких и драгоценных металлов,
- использование металлических подложек взамен керамических с улучшением изоляционных качеств,

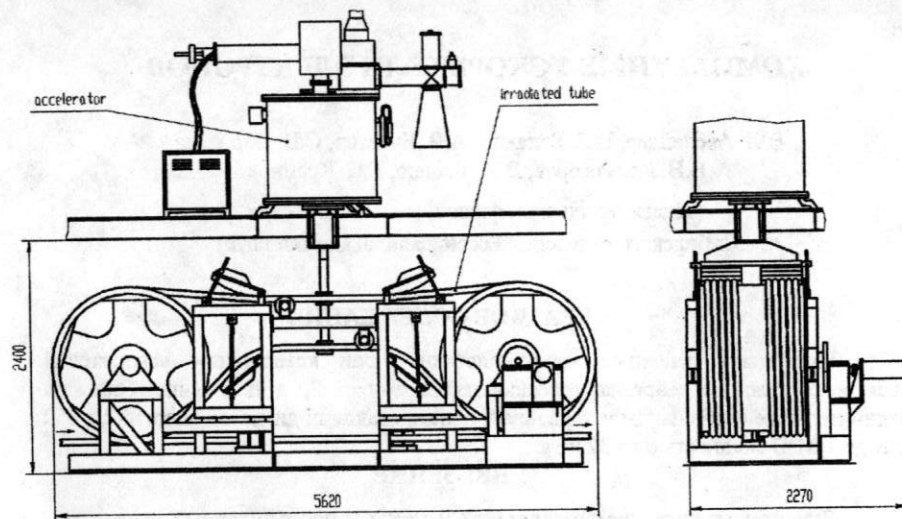


Рис.11. Установка для облучения толстых кабелей и труб.

- полная автоматизация процесса производства.
- б. Технология радиационной иммобилизации биологически активных веществ.
Достоинствами применения радиационной технологии в сравнении с обычными классическими химическими методами иммобилизации являются:
 - существенное снижение стоимости производства продукции,
 - высокая скорость технологического процесса (облучение в потоке),
 - уменьшение теплового и химического загрязнения,
 - сокращение количества химических ингредиентов, необходимых для иммобилизации протеаз,
 - более эффективное использование электроэнергии,
 - возможность перестраивать ускоритель для решения сопутствующих задач: стерилизации непрерывных потоков растворов, смесей и производств гелей,
 - продолжительный срок службы оборудования.
 Подобные радиационно-технологические процессы относятся к практически безотходным видам производства.

На ускорителе ИЛУ-6 отработана технология производства и налажен мелкосерийный выпуск медицинских и ветеринарных препаратов на основе иммобилизованных ферментов, а также компонентов, используемых для очистки отходов молочной и целлюлозной промышленности. Ведутся исследования новых компонентов для радиационной иммобилизации (сыворотки, экстракты лекарственных растений) с целью создания биологически активных веществ пролонгированного действия, устойчивых к воздействиям окружающей среды.

КОМПАКТНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

В.Л. Ауслендер, В.Е. Балакин, А.В. Булатов, С.В. Воробьев,
В.В. Колмогоров, В.В. Леонов, Г.С. Крайнов

(Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Приведены основные характеристики серии компактных ускорителей электронов прямого действия, работающих на частоте 20 кГц и выше. Описаны отличительные особенности ускорителей, перекрывающих диапазон энергий от 250 кэВ до 1 МэВ мощностью до 32 кВт.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники преобразователей частоты и промышленный выпуск высокочастотных выпрямительных столбов (КЦ108В, 2Ц121) позволили предложить серию компактных ускорителей, работающих на частоте 20 кГц и выше.

Компоновка узлов ускорителей этого типа принята аналогичной с компоновкой известных ускорителей типа ЭЛВ и в связи с этим они получили сокращенное наименование ускорители ВЧЭЛВ. Их каскадный генератор ускоряющего напряжения с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов представляет собой систему идентичных, соединённых последовательно выпрямителей. Последние при помощи взаимной индукции связаны с общей первичной обмоткой. Все выпрямители собраны по схеме с умножением напряжения в два или четыре раза.

Удельная мощность в первичном контуре трансформатора пропорциональна запасаемой в контуре удельной энергии в и частоте питающей сети. Часть этой мощности, определяемой коэффициентом индуктивной связи между контурами 1 и 2 трансформатора, можно передать в нагрузку. Очевидно, что при заданных размерах ускорителя, отбираемую мощность можно наращивать за счёт увеличения частоты. При этом одновременно с ростом частоты растёт добротность первичного контура, что существенно повышает КПД ускорителя.

Отличительные особенности этих ускорителей следующие:

1. Повышенная в 20 - 50 раз частота питания по сравнению с существующими ускорителями этого типа.
2. Выпрямительные каскады собраны по схеме с умножением переменного напряжения в два или четыре раза. При этом схема учетверения напряжения позволяет поднять градиент напряжения по выпрямительным каскадам с 10 кВ/см до 14 кВ/см.
3. Высокая удельная объёмная мощность источника ускоряющего напряжения, достигающая 130 кВт/м³.
4. В системе развёртки пучка электронов применён доворотный магнит, позволяющий работать с углами развёртки, много большими 60° без увеличения потерь на фольге выпускного окна.

5. В качестве газовой изоляции используется сжатый азот с 5-10% добавкой элегаза. При эксплуатации ускорителя смесь повторно не используется, поэтому в составе оборудования отсутствует система для перекачки и сжижения элегаза.

6. Малый (порядка 1%) разброс энергии электронов из-за небольшого коэффициента пульсации выпрямленного напряжения.

ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

Основные характеристики рассматриваемых ускорителей приведены в таблице.

Таблица

Параметры	ВЧЭЛВ-2	ВЧЭЛВ-3	ВЧЭЛВ-4
Энергия max, МэВ	0,5	1,0	1,0
Мощность, кВт	16	16	32
Выпускное окно, мм	75x980	75x980	75x980
Рабочее положение	Вертикальное	Вертикальное	Горизонтальное
Объём сосуда, м ³	0,11	0,155	0,24
Давление газа, МПа	1,2	1,2	1,2
Кратность умножения напряжения	2	4	4
Масса, кг	240	240	560
КПД, %	85	87	87
Габаритные размеры, мм	1600x1920x540	1600x1980x540	2500x1320x980
Число каскадов	60	48	96
Напряжённость электрического поля в зазоре, кВ/см	135	150	140

Примечание: Рассматриваемые ускорители отличаются друг от друга только конструкцией генератора ускоряющего напряжения и длиной изолятора ускоряющей трубки. Всё остальное оборудование идентично для всех модификаций. Сдвоенный ускоритель питается двумя блоками, в которых расположены тиристорные преобразователи частоты.

Размеры и объём генератора ускоряющего напряжения определяются энергией электронов и ограничиваются

1. электрической прочностью газовой изоляции;
2. необходимым коэффициентом индуктивной связи между контурами, который обычно лежит в пределах 0,5-0,75;
3. максимально допустимым градиентом напряжения вдоль оси ускорителя.

Если пункты 1 и 2 можно считать заданными, то пункт 3 даёт возможность для уменьшения размеров генератора ускоряющего напряжения.

В существующих ускорителях со встроенной в генератор ускорительной трубкой градиент напряжения не более 10 кВ/см и ограничивается он конструкцией выпрямительных каскадов (секций). Многократное увеличение частоты питания позволяет применить выпрямительные схемы с умножением напряжения в 4 раза, что разгружает по напряжению катушки каскадов и позволяет поднять градиент до 14 кВ/см.

НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Генератор ускоряющего напряжения с индуктивной связью представляет собой систему последовательно соединённых выпрямителей, которые при помощи взаимной индукции связаны с общей первичной обмоткой трансформатора Г (рис. 1).

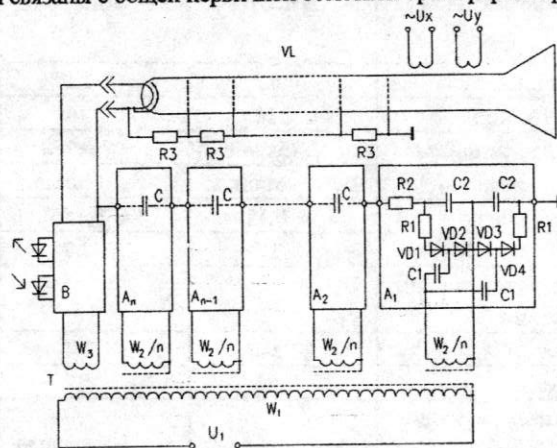


Рис. 1. Электрическая схема ускорителя HFELV.

При расчёте таких генераторов каскадное включение выпрямителей можно заменить одним эквивалентным выпрямителем с суммарным напряжением U_2 , у которого число витков вторичной обмотки W_2 равно сумме витков всех обмоток выпрямителей (секций). Эквивалентной ускорительной трубке нагрузкой в схеме замещения служит переменное сопротивление, определяемое по выражению:

$$R'_H = U_0 / (I_0 \cdot m^2) = R_H / m^2, \quad (1)$$

где: U_0 – ускоряющее напряжение,
 I_0 – ток пучка электронов,
 R_H – сопротивление нагрузки,
 m – кратность умножения напряжения.

Электрическая схема каскадного генератора выглядит так, что трансформатор без магнитопровода через диоды заряжает цепочку из n емкостей с эквивалентным значением C/n , к которой подключена нагрузка R_H . Элементом,

ограничивающим снимаемую мощность, является индуктивность рассеивания трансформатора. В [2,3] рассмотрено влияние индуктивности в зарядной цепи выпрямителя. Выражение для среднего тока вторичной обмотки трансформатора для значений $U_2/e_{2m} < 0,5$ имеет вид:

$$I_2 = m \cdot I_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{e_{2m}}{(1-k^2)\omega L_2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_2}{e_{2m}}\right)^2}, \quad (2)$$

где: U_2 – суммарное напряжение обмоток выпрямителей (секций) под нагрузкой;

e_{2m} – суммарная электродвижущая сила взаимной индукции при холостом ходе всех обмоток выпрямителей (секций);

L_2 – суммарная индуктивность каскадов (секций);

Для граничного значения $U_2/e_{2m} = 0,537$, при котором длительность импульсов тока через диоды достигает максимального значения, равного $\pi\omega$, выражение для среднего тока упрощается и имеет вид:

$$I_2 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_2}{(1-k^2)\omega L_2}, \quad (3)$$

Максимальное значение мощности, передаваемой в нагрузку, будет при $U_2/e_{2m} \approx 0,5$. При падении напряжения под нагрузкой до уровня 0,537 от холостого хода мощность P_2 будет равна:

$$P_2 = 0,64 \cdot \frac{U_2^2}{(1-k^2)\omega L_2}. \quad (4)$$

При известных значениях $U_2 = U_0/m$, R_H , $\omega = 2\pi f$ из (3) определяется требуемое значение суммарной индуктивности каскадов (секций) L_2 . После этого легко вычисляются все остальные параметры трансформатора.

Используя известные в электротехнике выражения для энергии $W_{2m} = \psi_{2m}^2 / L_{2m} / 2$, запасаемой во вторичном контуре, и индуктивности $L_2 = \psi_{2m}^2 / I_{2m}^2$ выражение (4) можно преобразовать. Здесь ψ_{2m} – потокосцепление, равное $W_2 \cdot \Phi_{2m}$, где Φ_{2m} – магнитный поток вторичного контура. Поскольку переменное напряжение U_2 под нагрузкой имеет прямоугольную форму, для него справедливо выражение

$$U_2 = \frac{2}{\pi} \omega \Psi_{2m}, \quad (5)$$

Подставляя значения U_2 и L_2 в (4), получим:

$$P_2 = \frac{0,52}{1-k^2} \cdot \omega W_{2m} \quad (6)$$

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ УСКОРИТЕЛЕЙ

Ускорители мощностью 16 кВт по компоновке основных узлов подобны ускорителям типа ЭЛВ (рис.2). Они имеют встроенную в каскадный генератор ускорительную трубку, экранированную от магнитного поля короткозамкнутыми медными кольцами. Выпускное устройство имеет две развёртки. Основная развёртка, отклоняющая пучок на угол $\pm 45^\circ$ с частотой 50 Гц, снабжена доворотным магнитом, снижающем потери на выпускном окне. Выпускное окно имеет две фольги. Допол-

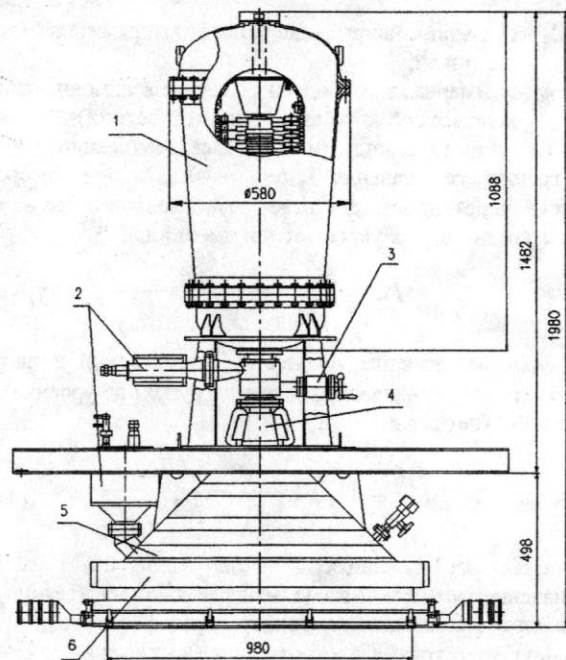


Рис.2. Общий вид ускорителя ВЧЭЛВ-3.

1 - сосуд высокого давления; 2 - вакуумный насос; 3 - шибер;
4 - развёртка; 5 - выпускное устройство; 6 - доворотный магнит

нительная более тонкая фольга предохраняет от соприкосновения с обрабатываемой средой основную титановую фольгу, нагруженную атмосферным давлением. В щели между фольгами высоконапорным вентилятором продувается воздух, охлаждающий обе фольги.

Удвоение мощности ускорителя даёт компоновка, показанная на рисунке 3.

Сдвоенный генератор ускоряющего напряжения имеет

а) охлаждаемую водой первичную обмотку из двух частей и

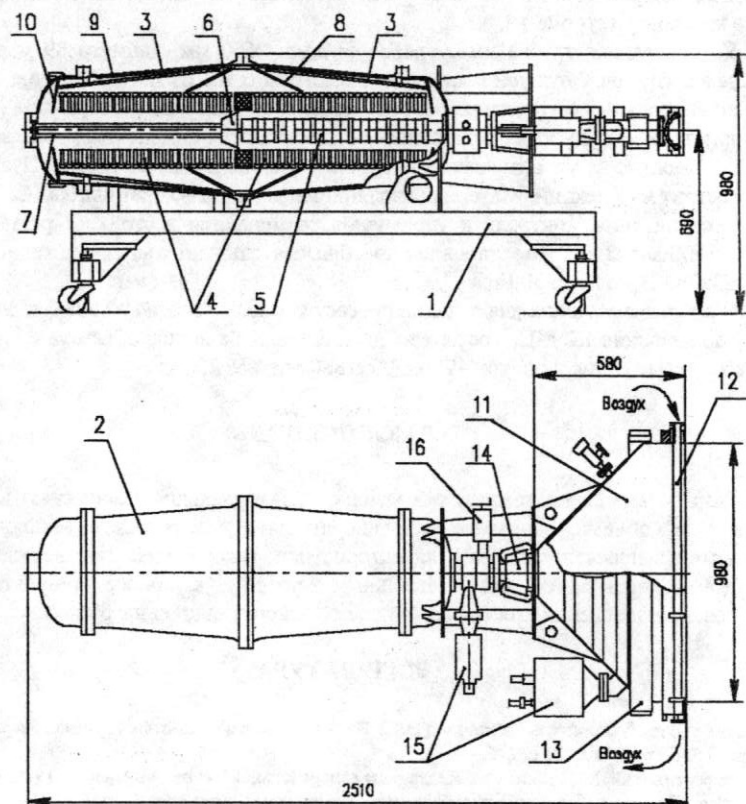


Рис.3. Конструкция ускорителя ВЧЭЛВ-4.

1 - несущая платформа; 2 - сосуд под давлением; 3 - первичная обмотка;
4 - выпрямительные секции; 5 - ускорительная трубка; 6 - блок управления;
7 - световод; 8 - поддерживающий изолятор; 9 - магнитопровод;
10 - магнитопровод; 11 - выпускное устройство; 12 - выпускное окно;
13 - доворотный магнит; 14 - развёртка; 15 - вакуумные насосы;
16 - шибер.

б) две секционированные вторичные обмотки, соединённые параллельно и работающие на одну ускорительную трубку.

Преимущества сдвоенного исполнения описаны в [4]. Горизонтальное расположение оси ускорителя достигается креплением выпрямительных каскадов (секций) каждой вторичной обмотки тремя изоляционными стержнями к днищу сосуда. Ускоритель собран на передвижной раме. Правая часть генератора

напряжения вместе с ускорительной трубкой, вакуумными насосами и выпускным устройством жёстко прикреплены к раме. Левая часть генератора установлена на выдвигные направляющие полозья рамы и может по ним откатываться при осмотре и ремонте устройства.

Ускорительная трубка имеет рабочую длину 660 мм, диаметр 89 мм. Она снабжена электронной пушкой с катодом диаметром 6 мм из LaB_6 . Питание блока управления пушкой осуществляется от отдельной катушки вторичной цепи трансформатора. Регулировка тока пушки осуществляется изменением тока накала катода с помощью двух оттоэлектронных пар, управляемых с пульта. Изолятор трубки состоит из 5 секций. Материал изоляционных колец – керамика 22ХС.

Пост питания, контроля и управления размещается в стойке с размерами 570x570x1600 мм. Здесь же установлен преобразователь частоты. Напряжение сети питания 3x380 В, частота 50 Гц.

Пост газоснабжения для заполнения сосуда смесью азота (90-92%) и элегаза (8-10%) до давления 1,2 МПа состоит из двух газовых баллонов объёмом 40 л каждый. Габаритные размеры поста – 290x500x1800 мм, вес 220 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана серия компактных ускорителей с удельной мощностью до 130 кВт на 1 м³ объёма, занимаемого генератором ускоряющего напряжения. Ожидаемые (запроектированные) характеристики ускорителей подтверждаются результатами испытаний выпрямительных секций, а также результатами моделирования поведения электрической схемы ускорителя под нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И. Будкер и др. Ускоритель электронов ЭЛВ-1 для народного хозяйства, Атомная энергия, Москва, 1976, т.40, вып.3, с. 216.
2. Б.И. Альбертинский, М.П. Свиньин, Каскадные генераторы, Москва, Атомиздат, 1980, с. 58.
3. Б.А. Кныш, Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов, Ленинград, Энергоиздат, 1981, с. 18.
4. Р.А. Салимов и др., Сдвоенные ускорители типа ЭЛВ, препринт № 79-54, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, 1979, с. 3.

ПОЛИМЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ.
2. ТОМСК

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ И КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов, Е.И. Миронов
(АООТ «Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности», Москва)

В.Л. Ауслендер, Р.А. Салимов, Г.А. Спиридонов
(Институт ядерной физики им Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск)

Вторая половина уходящего XX века характеризуется возникновением развитием и становлением трех принципиально новых научно-технических направлений:

- ядерная энергетика (ядерные энергетические установки для атомных электростанций, крупных судов надводного и подводного плавания),
- ракетно-космическая техника и сверхзвуковая реактивная авиация,
- информатика и связь.

Вследствие этого появилась потребность в кабельных изделиях, удовлетворяющих комплексу новых, более жестких, а подчас и специфических требований, в том числе повышенная надежность при монтаже и эксплуатации, наряду с миниатюризацией, повышенная нагревостойкость, как кратковременная так и длительная, радиационная стойкость.

Начиная с 1957 года, АО ВНИИКИ были развернуты работы по исследованию поведения традиционных электроизоляционных полимерных материалов, в первую очередь полиэтилена, в специфических условиях эксплуатации, выявлены некоторые нетривиальные эффекты и установлена возможность использования ионизирующих излучений высокой энергии для модифицирования свойств полимеров, в частности их радиационного сшивания.

В 1958 году началось многолетнее творческое сотрудничество АО ВНИИКИ и ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова по систематическому изучению радиационно-химических превращений в полимерах механизмов их радиационного сшивания и исследованию свойств и эксплуатационных характеристик радиационно-спитых полимеров в зависимости от индивидуальности химического строения их цепи, условий и режимов облучения.

Анализ обширного массива накопленных экспериментальных данных [1, 2] привел к следующим основным выводам:

-облучение кабельных композиций промышленного полиэтилена ионизирующими излучениями высокой энергии в оптимальных условиях (поглощенная доза излучения, среда при облучении и др.) вследствие радиационного сшивания

обеспечивает придание изделиям формоустойчивости при температурах, превышающих температуру плавления исходного термопластичного материала, повышение нагревостойкости и, применительно к изоляции кабельных изделий, позволяет повысить температуру длительной эксплуатации с 70-80 °С до 100-105 °С (при дальнейшем повышении температуры резко возрастает скорость окисления и как следствие быстро утрачивается эластичность), а также увеличить надежность кабельных изделий при кратковременном повышении температуры до 250 °С (стойкость к продавливанию под действием постоянной нагрузки) в случае коротких замыканий или токовых перегрузок. Это само по себе уже является практически важным результатом и оправдывает промышленное применение, однако не исчерпывает возможностей радиационного сшивания как метода получения нагревостойких электроизоляционных полимерных материалов, потенциально конкурентоспособных по сравнению с другими термостойкими полимерами, более дорогостоящими и менее технологичными;

-накопленные данные о влиянии условий облучения на конечные эксплуатационные свойства продукта и его длительную работоспособность при повышенных температурах подтвердили возможность применения для радиационного модифицирования полиэтиленовой (или другой сшивающейся) изоляции как изотопных источников гамма-излучения так и ускорителей электронов. Однако в первом случае технологический процесс, как правило, должен быть периодическим (из-за сравнительно низкой мощности дозы облучение необходимо проводить в бескислородной среде для предотвращения радиационного окисления), тогда как во втором случае он может быть непрерывным (высокая мощность дозы допускает облучение на воздухе вследствие диффузионных ограничений на деструктирующее влияние кислорода);

-метод радиационного сшивания может приобрести более существенное практическое значение, если удастся создать композиции полиэтилена, защищенные химически от вредного влияния кислорода воздуха в процессе длительной эксплуатации при повышенных температурах (более 100-105 °С), т.е. создать методы термостабилизации радиационно-сшитых полимеров.

Схематически основные направления и этапы работ, выполненных на пути от "пробирочных" экспериментов до внедрения электронно-лучевой технологии на кабельных заводах страны, показаны на рис. 1.

По существу техническая и экономическая целесообразность промышленной реализации электронно-лучевой технологии, уже свыше 25 лет применяемой в России при производстве нагревостойких проводов кабелей и электроизоляционных термоусаживаемых установочных изделий, predeterminedены решением четырех ключевых проблем:

-разработаны ускорители электронов (типов ЭЛВ и ИЛУ), обладающие приемлемыми физико-техническими характеристиками и достаточной надежностью наряду с простотой эксплуатации в условиях промышленного производства продукции (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН) [3];

-развиты принципы термостабилизации радиационно-сшитых полимеров и на их основе разработаны рецептуры электроизоляционных, электропроводящих и шланговых композиций, обладающих длительной работоспособностью при

температурах выше 105 °С (АО ВНИИКП совместно с ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова, АО "Пластполимер" и НИИХТ полимеров им. В.А. Каргина) [4, 5];

-разработаны различные эффективные модификации подлучкового технологического оборудования, транспортирующего гибкие протяженные изделия (провода, кабели, трубки) через выведенный в атмосферу пучок электронов, обеспечивающего удовлетворительную равномерность поглощенной дозы излучения в объеме полимерного материала (АО ВНИИКП, в том числе при участии ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН) [6, 7];

-разработана система очистки вентиляционных выбросов, обеспечивающая экологическую безопасность электронно-лучевой технологии (АО ВНИИКП совместно с ДФ ВНИИОГАЗ) [8].

С использованием широкого ассортимента разработанных полимерных



Рис. 1 Основные направления и этапы работ в области создания электронно-лучевой технологии применительно к задачам электроизоляционной и кабельной техники

композиций, оборудования и технологических принципов на шести заводах электротехнической промышленности бывшего СССР с применением ускорителей ЭЛВ-1, ЭЛВ-2, ЭЛВ-4, ИЛУ-8 (энергия электронов до 1,5 МэВ мощность в пучке 20-50 кВт) к 1985 году функционировали 16 технологических

линий (табл. 1), на которых с применением электронно-лучевой технологии было организовано производство нагревостойких проводов и кабелей различного назначения, а также электроизоляционных термоусаживаемых установочных изделий [9, 10].

В последние годы, наряду с реконструкцией имеющихся на кабельных заводах радиационно-технологических линий путем замены ускорителей типа ЭЛВ-1 и ЭЛВ-2 более современными ускорителями ЭЛВ-4, характеризующимися большей мощностью электронного пучка, а также оснащенной системой автоматического управления на базе ЭВМ, основное внимание было уделено выявлению и развитию новых подходов, ведущих к решению двух основных задач: дальнейшему повышению эффективности технологического процесса электронно-лучевой обработки изделий и обеспечению охраны окружающей среды. В этой связи усилия были сосредоточены главным образом на материаловедческих, технологических и экологических аспектах.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО СПИВАНИЯ

Как известно, весь комплекс физико-химических и эксплуатационных свойств радиационно-спитой полимерной композиции, - при заданных ее характеристиках и составе (химическое строение полимерной цепи, молекулярно-массовое распределение, наличие и природа функциональных ингредиентов, например,

Таблица 1

Динамика роста использования ускорителей
электронов в кабельной промышленности

	Годы			Назначение
	1968-1969	1972	1973-1994	
АО ВНИИКП	ЭЛТ-1,5 1 шт. ЭЛТ-2,5 1 шт. ЭГЭ-2,5 1 шт.	ЭЛВ-1 1 шт. ЭЛВ-2 2 шт.	ЭЛВ-2 1 шт.	Опытно-промышленные установки: исследовательские работы и производство мелкосерийной и уникальной продукции
АО Экспокабель			ЭЛВ-1 1 шт. ЭЛВ-2 1 шт.	Крупномасштабное производство серийной продукции: кабельные и термоусаживаемые изделия
Заводы электротехнической промышленности			ЭЛВ-1 6 шт. ЭЛВ-2 6 шт. ЭЛВ-4 2 шт. ИЛУ-8 1 шт.	

наполнителей, антиоксидантов, антипиренов и т.п.), - определяется плотностью пространственной сетки или, иными словами, густотой поперечных связей, т.е. в конечном счете - поглощенной дозой излучения ("технологической дозой").

Оптимальную поглощенную технологическую дозу выбирают на основе разумного баланса макроскопических свойств, определяющих технические характеристики материала, исходя из конкретного назначения изделия и условий его эксплуатации. Величина технологической дозы, - например, для облученной изоляции нагревостойких проводов на основе полиолефинов, - меняется в широких пределах в зависимости от композиции. Как видно из табл.2, если для кабельного полиэтилена марки 153-01К технологическая доза составляет 0,5 МГр, то для композиции 102-57, обладающей высокой работоспособностью при повышенных температурах (высокое содержание специально подобранной комбинации антиоксидантов) и значительной радиационной стойкостью, она достигает 1 МГр. Вместе с тем, понятно, что производительность радиационно-технологической установки обратно пропорциональна технологической дозе излучения, и чем она ниже, тем при прочих равных условиях эффективность процесса выше.

Традиционные методы снижения технологической дозы путем введения в композицию так называемых "прорадов" т.е. соединений, промотирующих процесс радиационного сшивания (например, полифункциональных мономеров аллильного ряда) достаточно эффективны, но практическое применение их ограничено неудобствами, которые трудно преодолеть в производственных условиях.

В процессе проведения поисковых работ удалось выявить соединения, выполняющие совмещенные функции: и антиоксиданта, и прорада. Из табл.2 видно, что композиции 108-273 и 108-274 характеризуются в 2-2,5 раза меньшей технологической дозой по сравнению с обычным кабельным полиэтиленом 153-01К, хотя их работоспособность при температурах выше 105°C более чем на порядок величины выше; в результате, наряду со значительным повышением эффективности радиационно-технологического процесса, улучшается и качество изделий.

Эксплуатационные характеристики некоторых электроизоляционных полимерных композиций, специально предназначенных для радиационного сшивания, приведены в табл.2 в сравнении с характеристиками облученного промышленного полиэтилена кабельной марки 153-01К. При близких значениях физико-механических свойств работоспособность специальных композиций при повышенных температурах (более 105°C) на 1,5-2,0 порядка величины выше, чем промышленного облученного кабельного полиэтилена (рис.2).

В ассортименте разработанных для радиационного сшивания полимерных электроизоляционных композиций имеются материалы не только с улучшенной технологичностью (например, как уже было отмечено выше, композиции 108-273 и 108-274 требуют в 2-2,5 раза меньшей технологической дозы по сравнению с обычным кабельным полиэтиленом и обладают при этом существенно более высокой работоспособностью при повышенных температурах), но и с повышенной радиационной стойкостью (композиция 102-57).

В последние годы значительное внимание было уделено повышению пожаробезопасности кабельных изделий, особенно применяемых на крупных про-

Таблица 2

Некоторые характеристики электроизоляционных композиций для радиационного сшивания

Показатель	Промышленный полиэтилен 153-01К по ГОСТ 16336-77	Композиции на основе полиэтилена				
		108-273	108-274	102-57	158-257	206-106
Технологическая доза, МГр	0,5	0,25	0,2	1,0	0,35	0,10
Относительное удлинение при разрыве, ϵ , не менее, %	350	450	400	400	400	500
Прочность при разрыве, σ , не менее, МПа	13,0	13,0	13,0	13,0	10,0	17,0
Сохранение ϵ и σ после теплового старения в течение 7 суток						
не менее, (ϵ/σ), при 175 °С	-	100/100	75/100	80/100	100/100	-
при 150 °С	75/100	100/100	100/100	100/100	100/100	80/100
при 136 °С	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
Кислородный индекс, %	18,0	18,0	18,0	18,0	28,0	25,5
Работоспособность *, час, не менее, при 200 °С	-	75	75	150	-	-
при 175 °С	10	500	500	700	300	-
при 150 °С	100	3000	3000	7000	3000	5000
при 120 °С	-	10000	10000	12000	-	5000
при 105 °С	500	20000	20000	Длительно	-	10000
Радиационная стойкость, не менее, МГр	0,2	1,0	1,0	6,0	0,75	0,10
*Критерий: снижение ϵ до 100%						

мышленных объектах, например, атомных электростанциях (АЭС). Разработанные радиационно-сшиваемые композиции (АО ВНИИКП совместно с АО "Пластполимер" и его Ново-Полоцким отделением) для изоляции (158-257) и для термоусаживаемых изделий (206-106) не распространяют пламя и изделия из них удовлетворяют требованиям МЭК332-3, а требуемая для их облучения технологическая доза также ниже, чем для полиэтилена марки 153-01К, т.е. и в этом случае повышение качества изделий (пожаробезопасность) сочетается с увеличением эффективности их производства с применением электронно-лучевой технологии.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ.

Облучение гибких длинномерных изделий обычно осуществляют путем перемотки их с отдающего на приемный барабан, причем на пути распространения выведенного в атмосферу развернутого электронного пучка при помощи двух блоков роликов или барабанов специальной конструкции (заправка "восьмеркой" или "рейстрекком") располагают предельно возможное количество параллельно облучаемых ветвей, чтобы в максимальной степени полезно использовать мощность пучка электронов.

Основная задача при разработке аппаратного оформления технологического процесса радиационного сшивания полимерных изделий (выбор источников излучения достаточной мощности с требуемой проникающей способностью излучения и конкретный способ организации зоны облучения, т.е. компо-

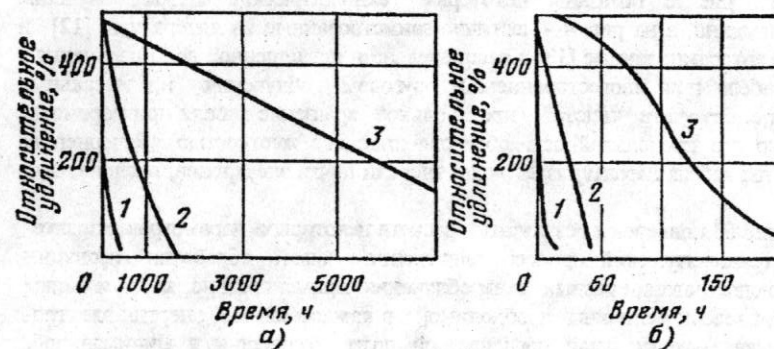


Рис.2 Зависимость относительного удлинения полиэтилена низкой плотности от длительности выдержки на воздухе при 150 (а) и 200°С (б). 1 - ПЭНП; 2 - то же с добавкой 10 массовых частей стабилизатора; 3 - 5-массовых частей термостабилизирующей системы.

новка и конструкция технологического оборудования, определяющие физические и геометрические условия взаимодействия излучения, генерируемого данным источником, и облучаемого объекта) сводится к достижению равномерного распределения поглощенной дозы излучения в объеме сшиваемого материала, т.е. обеспечению допустимой степени неравномерности поглощенной дозы излучения.

Решение этой задачи применительно к изоляции (оболочке) провода (кабеля) осложняется по крайней мере, двумя обстоятельствами:

- распределение поглощенной дозы излучения по толщине материала в направлении падения пучка электронов неравномерно и подчиняется закону, характеризующемуся немонотонной зависимостью;

- вследствие цилиндрической конфигурации провода (кабеля) толщина изоляции (оболочки) в направлении падения пучка электронов не постоянна и меняется по определенному закону, также характеризующемуся немонотонной зависимостью.

Для достижения требуемого комплекса свойств облучаемого изоляционного материала необходимо, чтобы в любом элементе его объема была поглощена доза излучения не ниже некоторой заданной, называемой минимальной технологической дозой. Поэтому, - в силу отмеченных выше обстоятельств, - часть материала оказывается переоблученной. Степень переоблучения необходимо минимизировать, так как набор избыточной дозы влечет за собой ухудшение эксплуатационных свойств материала и приводит к неоправданным затратам энергии. С этой целью, как правило, применяют многостороннее облучение, комбинируя различные схемы технологических линий не только с одним, но и с несколькими излучателями [11].

На рис. 3 показаны некоторые технологические схемы облучения кабельных изделий, а на рис. 4 - частично заимствованные из литературы [12] и полученные авторами данные [13] о распределении поглощенной дозы излучения в изоляции кабеля при многостороннем и круговом облучении в идеальных условиях, т.е. без учета "твиста" (произвольное вращение кабеля при перематке относительно его продольной оси, обусловленное его жесткостью). Зачерненная площадь жилы кабеля характеризует долю энергии пучка электронов, поглощенную жилой.

В табл.3 приведены результаты расчета некоторых параметров, характеризующих технологический процесс электронно-лучевой обработки изоляции кабеля при использовании разных схем облучения применительно к двум типам изделий. Приведены величины необходимой в каждом случае энергии электронов, отношение максимальной поглощенной дозы излучения к минимальной, затраты энергии пучка электронов на облучение 1 км кабеля, в том числе энергии, затрачиваемой на переоблучение материала и поглощенной в жиле кабеля. Расчет проведен при значении минимальной поглощенной технологической дозы излучения, равной 10 Мрад (0,1 МГр) без учета "твиста".

При заданной толщине изоляции минимальная энергия электронов требуется при четырехстороннем или круговом облучении. Применение таких схем облучения позволяет также минимизировать ток пучка электронов (т.е. снизить требуемую мощность источника излучения), так как отношение максимальной дозы к минимальной в этих случаях наиболее выгодное.

Данные расчета показывают, что в случае относительно тонких изделий приемлемое качество облучения и достаточная экономичность могут быть достигнуты при двухстороннем облучении, тогда как в случае крупногабаритных изделий этот способ облучения приводит к низкому качеству обработки и повышен-

ному расходу энергии. Связано это с тем, что при двухстороннем облучении даже строго с противоположных сторон пространственная неоднородность поглощенной дозы излучения в изоляции весьма высока, а "твист" при обработке еще углубляет эту неоднородность [12].

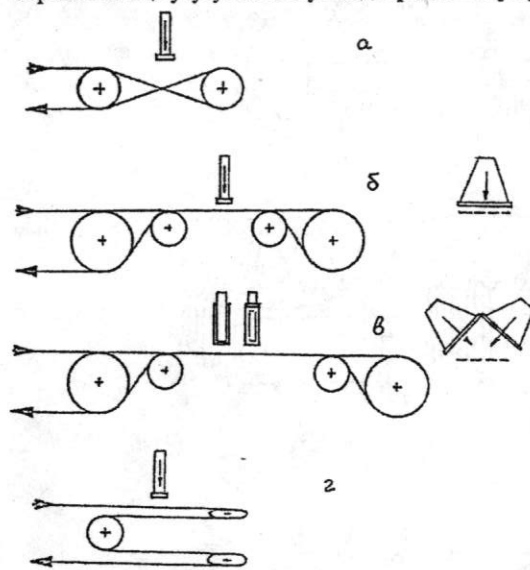


Рис.3 Схемы технологических линий для различных способов облучения кабельных изделий.

а - двухстороннее облучение в виде «восьмерки»;
б - двухстороннее облучение в одной плоскости;
в - четырехстороннее облучение с помощью двух ускорителей электронов, установленных под углом 45° к плоскости перематки кабельного изделия;
г - четырехстороннее облучение с поворотом направления перематки кабельного изделия.

Как показывает опыт, двухстороннее облучение при многопроходной схеме перематки обеспечивает достижение приемлемой равномерности поглощенной дозы излучения в пределах объема изоляции при используемых энергиях электронов до 1,5 МэВ, ограниченных значениями наружного диаметра и толщины изоляции кабельного изделия. Однако при этом неизбежны потери электронов как за счет "пролета" их между соседними витками перематываемого под пучком кабельного изделия, так и вследствие неполного поглощения электронов в изоляции (оболочке), связанного с цилиндрической формой изделия.

С целью более эффективного использования мощности пучка электронов разработаны и внедрены в промышленную практику [7,14, 15] различные модификации электромагнитных систем, располагаемых под выпускным раструбом ускорителя и формирующих такую топографию магнитного поля, которая обеспечивает возвращение к объекту облучения непоглощенных им электронов (одна из разновидностей электромагнитной системы приведена на рис.5).

В табл.4 приведены выраженные в процентах значения относительного увеличения линейной скорости перемещения провода под пучком для достижения заданной поглощенной дозы в случае применения электромагнитной системы типа "магнитного зеркала" ($\delta = (V - V_0) / V_0$, где V и V_0 - скорости перемещения кабель-

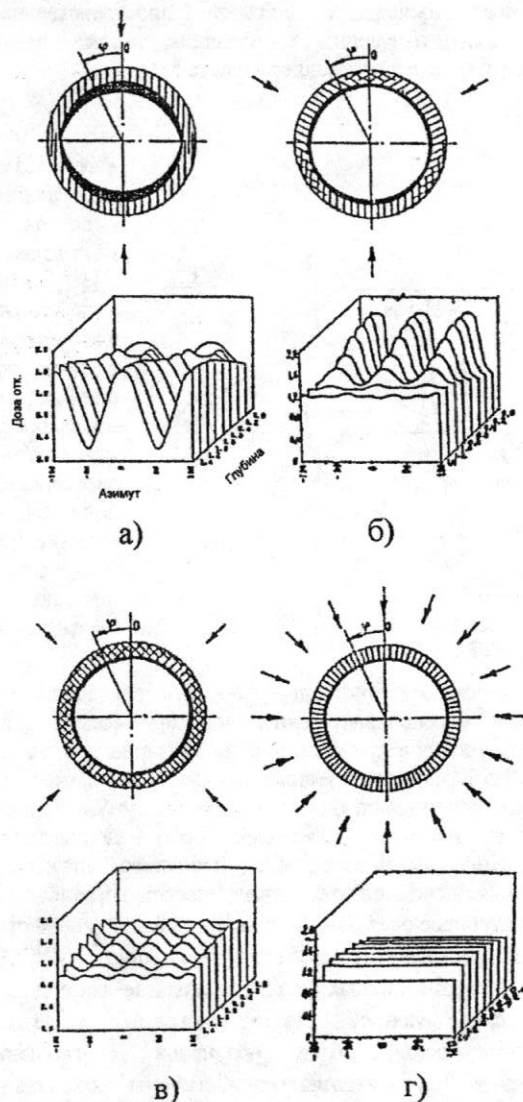


Рис. 4 Распределение поглощенной дозы излучения в изоляции кабеля

- а) двухстороннее облучение,
 б) трехстороннее облучение,
 в) четырехстороннее облучение,
 г) круговое облучение в идеальных условиях (без учета "твиста").

ного изделия при использовании электромагнитной системы и без нее) для проводов различных сечений. Видно, что производительность радиационно-технологической установки вследствие применения электромагнитной системы возрастает в 1,2-2 раза, а для наиболее употребительных сечений - в 1,5-2 раза.

С учетом необходимости удовлетворения потребностей разных отраслей промышленности в нагревостойких проводах и кабелях повышенной надежности и, соответственно, достаточно широкого их ассортимента, при создании радиационно-технологических установок, как правило, исходили из принципа их достаточ-

Таблица 3
 Влияние схемы облучения кабельных изделий на некоторые параметры технологического процесса

Параметр	Круговое	4-сторон.	3-сторон.	2-сторон.
Кабель: жила 1 мм, изоляция толщиной 1 мм				
$E, \text{ МэВ}$	0.5	0.55	0.61	0.7
D_{\max}/D_{\min}	1.2	1.32	2.1	2.9
$W_{\min}, \text{ кДж}$	620	620	620	620
$W_{\text{ins}}, \text{ кДж}$	37	62	112	198
$W_{\text{cond}}, \text{ кДж}$	50	75	149	428
$W_{\text{tot}}, \text{ кДж}$	707	757	881	1246
$W_{\text{tot,}}/W_{\min}$	1,14	1,22	1,42	2,01
$W_{\text{tot,}}/W_{\text{tot,0}}$	1	1,07	1,25	1,76
Кабель: жила 150 мм ² , толщина изоляции 1.4 мм				
$E, \text{ МэВ}$	0.65	0.75	0.90	1.45
D_{\max}/D_{\min}	1.15	1.29	2.3	3.5
$W_{\min}, \text{ кДж}$	6800	6800	6800	6800
$W_{\text{ins}}, \text{ кДж}$	610	1160	4500	8500
$W_{\text{cond}}, \text{ кДж}$	680	1970	9100	21900
$W_{\text{tot}}, \text{ кДж}$	8090	9130	20400	37200
$W_{\text{tot,}}/W_{\min}$	1,19	1,46	3,0	5,47
$W_{\text{tot,}}/W_{\text{tot,0}}$	1	1,24	2,52	4,6

Параметры:

- E — энергия электронов;
 D_{\min} — необходимая минимальная доза;
 D_{\max} — максимальное значение поглощенной дозы;
 W_{\min} — необходимые энергозатраты на 1 км кабеля;
 W_{ins} — энергозатраты на переоблучение изоляции;
 W_{cond} — энергозатраты в проводнике;
 W_{tot} — полные энергозатраты;
 $W_{\text{tot,0}}$ — полные энергозатраты при круговом облучении

ной универсальности и ограничивались, в основном, электронно-лучевой обработкой кабельных изделий сравнительно небольших габаритных размеров.

Вместе с тем, в последние годы не только возник интерес к применению электронно-лучевой технологии в производстве крупногабаритных кабельных изделий, в частности, силовых кабелей достаточно больших сечений, но и появились для этого новые технические возможности. Этот интерес стимулируется появлением и все более широким использованием принципиально новых электроизоляционных полимерных материалов, - безгалогенных композиций на основе полиолефинов, - которые не только являются трудно горючими, т.е. не распространяют пламя, но и удовлетворяют наиболее жестким современным международным требованиям по комплексной пожаробезопасности, поскольку для них характерны весьма низкие уровни выделения дыма, коррозионно-активных и токсичных продуктов при воздействии открытого пламени.

Таблица 4

Относительное увеличение скорости перемещения провода под пучком (А) при применении электромагнитной системы типа "магнитное зеркало"

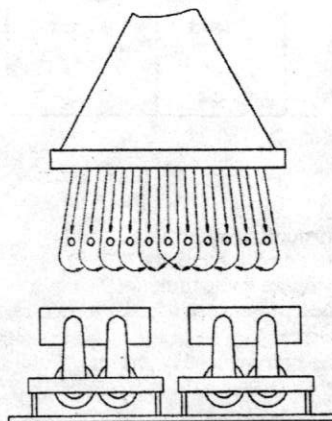
Сечение токопроводящей жилы, мм ²	0,2	0,35	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0	10
А, %	100	95	92	87	79	63	55	47	40

$$A = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100$$

V_0 - линейная скорость перемещения под пучком без применения электромагнитной системы;

V - то же, при использовании электромагнитной системы.

Рис.5 Электромагнитная система типа "магнитное зеркало"



Применение таких материалов существенно повышает технический уровень кабельных изделий. Например, производство силовых кабелей с изоляцией и оболочкой из безгалогенных композиций в сочетании с электронно-лучевой технологией их сшивания представляет собой яркий пример "высокой технологии" в кабельной технике, имеющей явные преимущества перед традиционными методами. Именно такой подход обеспечивает наиболее экономичное и технически совершенное направление существенного повышения пожаробезопасности кабельных

трасс на крупных промышленных (атомные и тепловые электростанции, химические и металлургические производства и т.п.) и коммунальных (метрополитен, высотные административные и жилые здания, сооружения культурно-зрелищного назначения, гостиницы и т.п.) объектах.

Из сказанного ранее очевидно, что для получения качественной изоляции крупногабаритных изделий необходимо применять ускорители с достаточно высокой энергией электронов и схемы кругового или четырехстороннего облучения.

Круговое облучение (рис.6) можно осуществить вращением кабеля относительно его продольной оси в процессе перемотки под пучком, т.е. синхронного вращения отдающего и приемного устройства. Такие схемы реализованы в мировой практике, но являются весьма громоздкими и требуют для размещения оборудования больших производственных площадей. Более рациональным решением является применение поворачивающихся магнитов, располагаемых под выпускным раструбом ускорителя, и сводящих пучок электронов, выведенный в атмосферу через традиционную линейную развертку, в одну точку [16]. Понятно, что как в том, так и в другом случае возможна только однопроходная система облучения.

Реализация кругового облучения силовых кабелей больших сечений может быть осуществлена по той или иной схеме с применением, например, ускорителя типа ЭЛВ-8 с непрерывным пучком, с энергией электронов до 2,5 МэВ и мощностью в пучке до 80 кВт.

Четырехстороннее облучение кабельных изделий, в том числе и достаточно крупногабаритных, может быть осуществлено и с использованием ускорителя

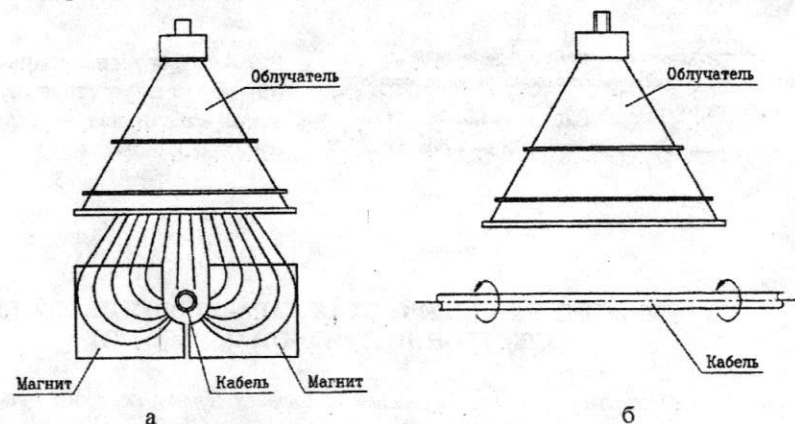


Рис.6. Способы осуществления кругового облучения кабельных изделий.

а - с помощью электромагнитной системы;

б - вращением кабеля относительно его продольной оси в процессе перемотки

типа ИЛУ. Импульсный характер электронного пучка этого ускорителя позволяет переключать его без потерь в различные каналы и, используя специальную кон-

струкцию выпускного раструба [17] с четырьмя окнами, осуществлять облучение четырьмя пучками электронов, генерируемыми одним ускорителем (Рис.7). На Рис.8 показана схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля под четырьмя выпускными окнами. Электронный пучок выпускается через каждое окно под углом 45° по отношению к плоскости перемотки кабеля и облучение в двух уровнях позволяет осуществить четырехстороннее облучение в многопроходной системе.

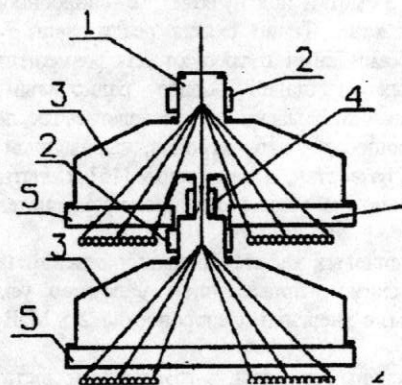


Рис.7. Устройство выпуска пучка для четырехстороннего облучения

1-узел развертки; 2-сердечник магнита развертки; 3 - вакуумная камера, 4 -фокусирующая линза, 5- выпускные окна. 6-облучаемое изделие.

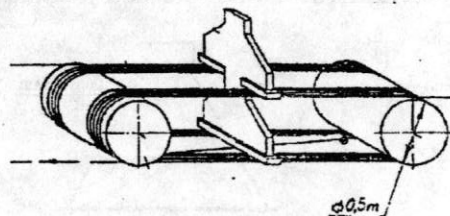


Рис.8.Схема технологической линии для четырехстороннего облучения кабеля под четырьмя выпускными окнами

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

Известно, что выпущенный в атмосферу пучок электронов генерирует в воздухе помещения озон O_3 и окислы азота NO_x , причем количество их возрастает с увеличением мощности пучка электронов и пробега их в воздухе, а вследствие радиолитического облучаемой полимерной композиции образуются газообразные продукты свыше пятидесяти наименований, в том числе токсичные соединения. Все эти продукты удаляют из помещения при помощи вытяжной вентиляции и сбрасывают в окружающую среду.

Анализ проб вентиляционных выбросов показал, что от одной радиационно-технологической установки для облучения кабельных изделий при мощности пучка электронов 20 кВт может выбрасываться в атмосферу в течение года до 1,2 т O_3 , до 0,4 т NO_x и приблизительно такое же количество продуктов радиолитического полимерных материалов и содержащихся в них функциональных добавок.

Снижение их концентрации в приземном слое на прилегающей территории до уровня предельно-допустимых концентраций (ПДК) или ниже обычно обеспечивается рассеиванием в атмосфере посредством выброса отходящих газов через вентиляционную трубу, представляющую собой весьма дорогостоящее и достаточно сложное инженерное сооружение. Например, радиационно-технологическая установка на базе двух ускорителей мощностью до 20 кВт каждый оснащается вытяжной трубой высотой около 70 м. При безусловной практической приемлемости способа рассеивания токсичных веществ в атмосфере для локального снижения их концентрации на прилегающей территории до допустимых уровней, очевидно, что такой подход не является оптимальным, поскольку он не исключает общего загрязнения окружающей среды. В этой связи проведены работы по созданию установки газоочистки, предотвращающей попадание токсичных веществ в вытяжную вентиляцию.

На протяжении ряда лет экспериментальный образец установки адсорбционно-каталитического типа, разработанной совместно АО ВНИИКИ и ДФ ВНИИОГАЗ [8], эксплуатировался на Опытно-промышленной установке АО ВНИИКИ. Очистка воздушных выбросов осуществляется в две стадии: на первой происходит адсорбция HC_1 , HF и NO_x и органических примесей, а на второй - термokatалитическое разложение озона. Это обеспечивает очистку вентиляционных выбросов от O_3 на 99,5%, а от сопутствующих примесей - на 95,9%.

Размещение установки газоочистки в общей системе приточно-вытяжной вентиляции каньона с ускорителем электронов осуществляется таким образом (рис.9), чтобы обеспечить принудительный отбор воздуха из зоны облучения, где и происходит в основном генерирование продуктов радиолитического воздуха и объекта облучения.

Оценку загрязненности атмосферного воздуха в приземном слое осуществляли путем расчетов рассеивания продуктов радиолитического на ЭВМ с учетом метеорологических характеристик атмосферы в зоне расположения здания радиационно-технологической установки. Определено (рис.10), что при использовании установки газоочистки в вентиляционном выбросе на уровне "конька" крыши здания концентрация токсичных веществ в приземном слое по всему расчетному периметру прямоугольника 1000 м x 1000 м составляет менее 0,1 ПДК, что предопределяет экологическую чистоту радиационно-технологического процесса [8].

В настоящее время промышленные радиационно-технологические установки на кабельных заводах оснащаются системами газоочистки, что служит существенным вкладом в охрану окружающей среды.

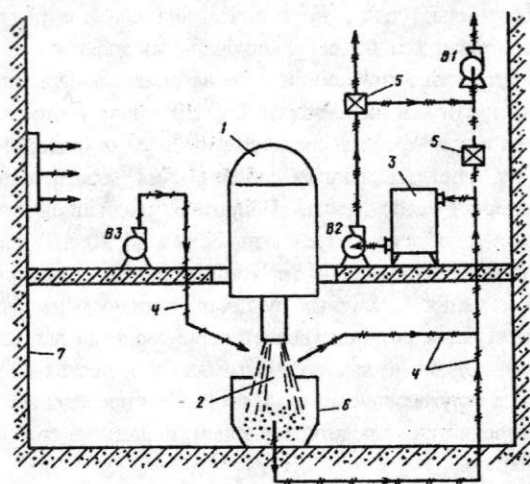


Рис.9. Технологическая схема вентиляционных выбросов при электронно - лучевой обработке кабельных изделий, включающая абсорбционно - каталитическую установку.

1- ускоритель электронов; 2 - зона облучения; 3 - установка газоочистки; 4 - воздуховоды; 5 - шиберы; 6 - подпучковый короб; 7- стена каньона; В1, В2, В3-вентиляторы.

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ.

На протяжении многих лет с применением электронно-лучевой технологии осуществляется промышленное производство широкого ассортимента кабельных и установочных изделий повышенной нагревостойкости и надежности, включающего

- монтажные провода,
- кабели управления малогабаритные
- судовые кабели, в том числе продольно герметизированные,
- контрольные кабели, в том числе с термоэлектродными жилами,
- силовые кабели,
- бортовые авиационные провода,
- коаксиальные кабели,
- кабели для АЭС, в том числе для использования в гермозоне,
- термоусаживаемые трубки и "перчатки", в том числе для использования в гермозоне АЭС, и др.

Особое внимание было уделено разработке и освоению промышленного производства терморезистентно-стойких кабелей и проводов для гермозоны АЭС, обеспечивающих не только ядерную безопасность АЭС (сохранение работоспособности систем безопасности ядерного реактора в условиях аварийных ситуаций различной тяжести), но и пожаробезопасность, в первую очередь не

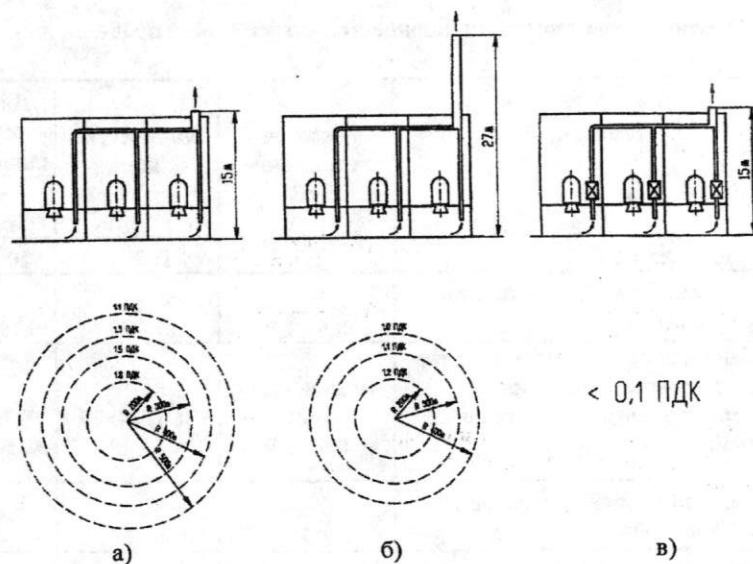


Рис.10. Карта-схема расположения изолиний ПДК для радиационно-технологической установки с тремя ускорителями электронов мощностью 20 кВт каждый

а - выброс на уровне крыши без применения системы газоочистки, б - выброс через трубу высотой 27 м без применения системы газоочистки, в - выброс на уровне крыши с применением системы газоочистки.

распространение пламени как при одиночной прокладке, так и при прокладке в пучках (табл.5). Достигнутые технические характеристики кабельных изделий удовлетворяют требованиям международных стандартов МЭК 332-1 и МЭК 332-3 по категории "А". В последнее время развернута работа по созданию нового поколения термопластичных и спитых материалов для изоляции и оболочки кабелей. Эти материалы не содержат галогенов и, следовательно, не выделяют токсичных и коррозионно-активных продуктов даже при нахождении в очаге пожара, а также обладают значительно более низким уровнем дымовыделения.

Кабели, разрабатываемые с применением материалов нового поколения, для сшивания изоляции и оболочек которых преимущественно используется электронно-лучевая технология, будут применены на проектируемых в настоящее время АЭС повышенной надежности и безопасности, а также при реконструкции действующих энергоблоков АЭС. Они получат также широкое применение при строительстве тепловых электростанций, крупных химических и металлургических производств, высотных зданий административного, культурно-зрелищного и коммунального назначения, а также при сооружении объектов и подвижного

состава метрополитена, электрифицированного железнодорожного транспорта, в судостроении и т.п.

Таблица 5

Номенклатура терморезистентных кабелей и проводов для АЭС

Назначение	Рабочее напряжение, кВ	Количество жил	Диапазон сечений (диаметров) жил, мм ² (мм)
Силовые кабели	1; 6	1; 3; 4;	10 -240
Контрольные кабели и кабели управления	0,6 - 1,0	7 - 37	0,75-4,0
Кабели для термоконтроля (с термомоноэлектродными жилами) и контроля энерговыделения в реакторе	низковольтные 0,6 - 1,0	2; 3; 14; 24 3 - 19	(0,7;2,1) 0,35 - 1,5
Кабели для цепей дозиметрического контроля	0,25	6 - 20	-
Кабели коаксиальные для линий связи ионизационных камер - корпусных реакторов - канальных реакторов	0,5 0,5	3 1	1,5 1,5
Провода для внутриприборного и межприборного монтажа, освещения и связи	0,15-0,75	1,2	0,12-6,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что использование уже достигнутых результатов в промышленном производстве, в частности, применение прогрессивных радиационно-сшиваемых полимерных композиций, усовершенствованного подпучкового технологического оборудования и предложенных способов обеспечения экологической безопасности процесса радиационного сшивания способствует дальнейшему повышению конкурентоспособности электронно-лучевой технологии по сравнению с альтернативными процессами сшивания.

В предыдущие годы из используемого в кабельной технике арсенала методов сшивания полимерных материалов (перекисное, силанольное, радиационное) на долю электронно-лучевой обработки приходилась "ниша", заполненная, в основ-

ном, монтажными проводами, специальными кабелями, миниатюрными кабелями управления и силовыми кабелями небольших сечений (до 95 мм).

Разработки последних лет в области создания ускорителей электронов для промышленных радиационно-технологических процессов с энергией электронов до 3 МэВ и мощностью в пучке до 100 кВт и более, прогрессивных пожаробезопасных электроизоляционных полимерных композиций, а также развитие новых технологических принципов электронно-лучевой обработки кабельных изделий открывают дополнительные перспективы для дальнейшего расширения масштабов применения этого прогрессивного научно-технического направления в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.Э. Финкель, В.Ф. Сучков. Ионизирующие излучения и кабельная техника. ВНИИЭМ. М. С.200. 1966.
2. Э.Э. Финкель, С.С. Лещенко, Р.П. Брагинский. Радиационная химия и кабельная техника. Атомиздат. М. С.313. 1968.
3. Ускорители для промышленных радиационно-технологических процессов. ЭЛВ. ИЛУ. Изготовитель ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, Внешторгиздат, 1984.
4. Э.Э. Финкель, Р.П. Брагинский, С.С. Лещенко. Стабилизация радиационно-модифицированных полиолефинов. Химия. М. С.200.1973.
5. Радиационная химия полимеров. Сб. под ред. акад. В.А. Каргина. Глава III. Радиационное модифицирование полиолефинов. Э.Э. Финкель, Р.П. Брагинский. Наука. М. С.186. 1973.
6. Э.Э. Финкель, С.М. Берлянт, В.Л. Карпов. Технология радиационного модифицирования полимеров. Энергоатомиздат. М. С.46. 1983.
7. Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов, Д.Н. Дикерман. Радиационная технология в электроизоляционной и кабельной технике - Состояние и перспективы// Journal of Industrial Irradiation Technology V.2, No.2, pp.155-182, 1984.
8. Е.И. Миронов, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др. Повышение экологической безопасности процессов радиационного модифицирования кабельной изоляции.// Сб. Исследование и производство кабелей и проводов. Энергоатомиздат. М. С.115-122. 1993.
9. Э.Э. Финкель, Р.П. Брагинский. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно-модифицированной изоляцией. Энергия, М., С.193, 1975
10. Д.Н. Дикерман, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др. Кабели и провода для ядерных энергетических установок. / Сб. под ред. Э.Э. Финкеля. Энергоатомиздат, М, С.134, 1983.
11. Э.Э. Финкель. Радиационная технология в кабельной технике. /Информэлектро, М., С.36, 1981.
12. R. Baurlein, H.D. Bickel. Irradiation Methods and Dose Uniformity in Radiation Cross-Linking of Cable and Wire Insulation. //Radiation Physics and Chemistry, V.18, No. 5-6, pp.837-846, 981.
13. Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов, В.Л. Ауслендер и др. Развитие электроннолучевой технологии в электроизоляционной и кабельной технике.//Электротехника, № 11, С.26-39,1996.
14. Э.Э. Финкель, Ю.Н. Тимко, Ю.М. Тимошин. Использование электромагнитных систем для повышения эффективности облучения протяженных изделий и улучшения равномерности поглощенной дозы излучения. //Radiation Physics and Chemistry, V.22, No.3-5, pp. 387-390, 1983.
15. Э.Э. Финкель, Ю.Н. Тимко, Е.И. Миронов и др. Электромагнитные системы для повышения эффективности процессов облучения изделий на ускорителях электронов. // Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве, Ленинград, НИИЭФА, С.301, 1988.
16. Э.Э. Финкель, Р.А. Салимов, Ю.Н. Тимко и др.// Повышение эффективности облучения электронным пучком цилиндрических объектов с помощью магнитных систем.// Атомная энергия, Т.53., Вып.5, С.317-319, 1982.
17. В.Л. Ауслендер, Э.Э. Финкель, Г.И. Мещанов и др. Способ радиационной обработки протяженных изделий. Авторское свидетельство на изобретение № 1314389, Приоритет 15.06.83, Выдано 01.02.87.

Кабельпромпроекта (А.Н. Омарков, Н.М. Капчанова), ВНИИРТ (Н.Г. Коньков), НИИХТП (В.В. Чудинова), НПО "Пластполимер" (А.Г. Сирота), внесших наибольший творческий вклад, за создание и освоение производства кабельных и установочных изделий с изоляцией из облученных полимерных материалов в 1986 году была присуждена премия Совета Министров СССР.

Хотя за прошедшие годы сделано немало полезного и для народного хозяйства, и для обороны страны, можно утверждать, что возможности применения электронно-лучевой технологии в кабельной технике еще далеко не исчерпаны и до "кризиса жанра" очень и очень далеко. Об этом свидетельствует как наш собственный, так и зарубежный опыт. И сейчас, несмотря на переживаемые нашей страной трудности и тяжелое положение, в котором оказалась наука, особенно прикладная, энтузиасты молодого поколения продолжают работать над созданием новых рецептур материалов для радиационного сшивания, совершенствовать технологию, оборудование, включая ускорители электронов, и разрабатывать новые кабельные изделия, столь необходимые для конкурентоспособности российской техники на мировом рынке.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ДООЧИСТКИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ

С.П. Буслаева, Б.М. Ванюшкин, Ю.А. Панин
(Всероссийский НИИ технической физики и автоматизации Минатома РФ)

В. Л. Варенцов, М.М. Нестеров
(Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН)

Ф.Ф. Кунков, В.А. Горбунов
(Всероссийское проектно-конструкторское научно-исследовательское и технологическое объединение ВНИПИЭТ Минатома РФ)

М.Э. Вейс, П.И. Немытов, С.Е. Петров, Р.А. Салимов, Г.А. Спиридонов
(Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН)

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы среди разнообразных возможных применений ускорителей электронов все большее внимание привлекает их использование для решения задач очистки стоков воды и отходящих газов. В нашей стране этому процессу способствовал положительный опыт разработки, создания и десятилетней успешной эксплуатации на очистных сооружениях Воронежского завода синтетического каучука первой промышленной установки электронно-лучевой очистки сточных вод со стойким поверхностно-активным веществом. Эта установка была введена в действие в 1984 и концу 80-х годов, когда по одному из описываемых в данной докладе проектов (назовем его для краткости Петродворцовый) принималось решение о его разработке, эта установка уже продемонстрировала и высокую эффективность используемой ею электронно-лучевой технологии и свою высокую работоспособность. Высокая эффективность этой технологии в Воронеже получена при ее сочетании с обычной биологической системой очистки. Вода из скважин сначала подвергалась обработке электронным пучком по специальной методике, описанной в [1], а затем она дообработывалась в обычной биологической системе очистки (рис.1). Эффективность работы этой установки демонстрирует схема, приведенная на рис.2, на которой показано изменение контура загрязнения грунтовых вод в районе действия установки. Первоначально площадь загрязнения составляла примерно 40-50 кв. км. Объем загрязненных стоками грунтовых вод точно не был оп-

ределен, но предполагалось, что он составлял несколько десятков миллионов кубометров.

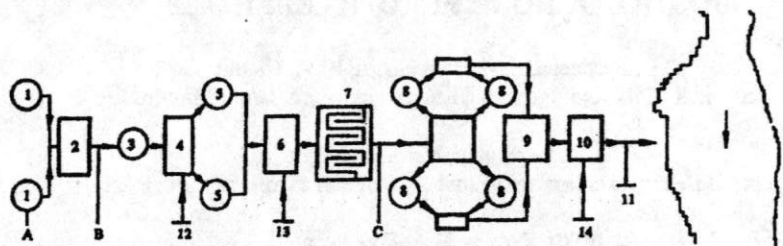


Рис.1. Принципиальная технологическая схема электронно-лучевой очистки сточных (грунтовых) вод Воронежского завода синтетического каучука от биологически стойкого поверхностно-активного вещества.

1 - скважины (10 - 35 тыс.м³/сут); 2 - ускорители электронов; 3 - насосная; 4,6,10 - резервуары для смешения воды; 5 - первичные отстойники; 7 - аэротенки; 8 - вторичные отстойники; 9 - сборный резервуар; 11 - сброс очищенных сточных вод (235 тыс.м³/сут); 12 - промышленные сточные воды после 2-ой технологической линии ВЗСК (20-25 тыс.м³/сут); 13 - муниципальные сточные воды (20 - 50 тыс.м³/сут); 14 - промышленные сточные воды после 1-ой технологической линии ВЗСК (165 тыс.м³/сут.). Содержание некаля, мг/л: 150 - 200 (А), 40 - 50 (В), 0,5 (С).

Максимальное содержание некаля в воде составляло в отдельных местах до 150-200 мг/л. После завершения пусконаладочных работ и работ по отработке технологии установка работала по 7-7,5 тыс. часов в год сначала на базе одного, а с 1988 года - двух ускорителей электронов, обрабатывая в зависимости от концентрации некаля в воде от 5 до 35 тыс.куб.м воды в сутки (при двух ускорителях). После 1988 года при работе этой установки единого поля заражения уже не существовало. Оно разбилось на отдельные пятна с повышенной концентрацией некаля. Ликвидация этих пятен потребовала дополнительной почти семилетней работы установки. К концу этого периода установка находилась в работе более десяти лет. Она сохранила свою работоспособность. Капитальные вложения на создание этой установки составляли около 2 млн руб. Расчетная экономическая эффективность этой установки составляла около 600 тыс.руб./год. Данные расчеты исходили из того, что альтернативным процессом считался процесс коагуляции с озонированием на базе существовавших в то время озонаторов. Весь приобретенный при работе этой установки опыт был использован при разработке установки доочистки сточных вод г. Кириши и АО "Киришифтеоргсинтез" (так же для краткости в дальнейшем этот проект будем называть Киришским), проект которой разрабатывался в конце 1993-начале 1994 года.

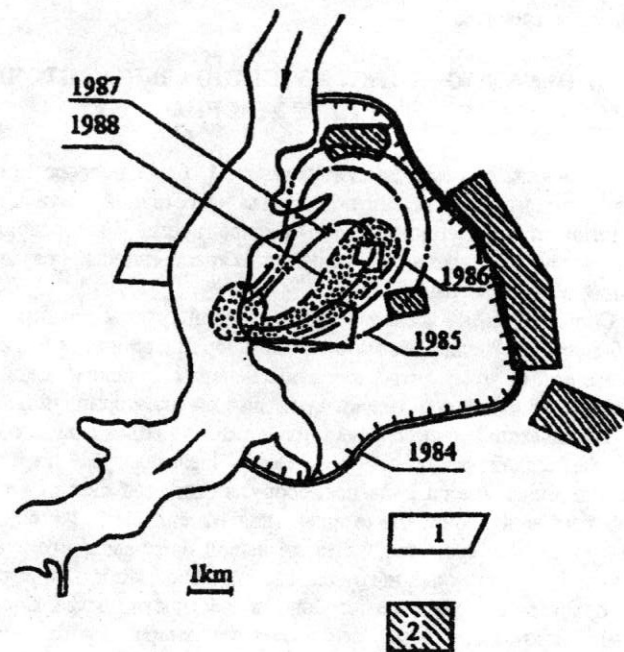


Рис.2. Изменение контура загрязнения при работе установки электронно-лучевой обработки сточных (грунтовых) вод с биологически стойким поверхностно-активным веществом в рай-оне Воронежского завода синтетического каучука. Водоозаборы питьевой воды: 1 - закрытые до обработки воды, 2 - открытые после обработки воды.

Для описываемых в данной статье разработок других проектов установок очистки различных вод на основе электронно-лучевой технологии был также важен приобретенный при разработке первой промышленной установки опыт организации и осуществления комплекса санитарно-гигиенических исследований и полученные в них результаты, убедительно продемонстрировавшие не только эффективность, но и безопасность использования электронно-лучевого метода обработки воды при тандемном сочетании электронно-лучевой технологии и биологической очистки.

Ниже даются краткие описания проектов двух установок доочистки сточных вод с использованием ускорителей электронов: установки доочистки

муниципальных сточных вод г. Петродворца и установки доочистки хозяйственно-бытовых и сточных вод г. Кириши и промышленных сточных вод АО "Киришинефтеоргсинтез".

УСТАНОВКА ДООЧИСТКИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД г. ПЕТРОДВОРЦА.

Разработка проекта данной установки была непосредственно связана с решением о строительстве защитной дамбы в восточной части Финского залива. Как известно это решение вызвало в свое время и продолжает вызывать многочисленные обсуждения и решения общественности, различных научных организаций и администрации.

Основываясь на исследованиях большой группы научных организаций, в конце 80-х годов Межведомственным координационным советом РАН был сделан вывод о том, что для обеспечения экологической безопасности отгороженной от Финского залива части водной акватории, называемой Невской губой, крайне важно срочно осуществить комплекс водоохраных мероприятий по всей системе "Ладожское озеро - река Нева - Невская губа", включающий в себя разработку и внедрение на очистных сооружениях этой системы технологических процессов глубокой доочистки сточных вод от биогенов, их обеззараживание и обезвреживание. По существу, данный вывод признавал, что в новых условиях повышенных антропогенных нагрузок, системы биоочистки, широко используемые для очистки сточных вод неспособны, в частности, эффективно задерживать патогенные микроорганизмы. Использование хлора и его производных для дополнительного обеззараживания сточных вод после биоочистки, хотя и позволяет снизить содержание кишечной палочки в стоках, сбрасываемых в водоемы, однако и остаточное ее количество после применения хлора продолжает представлять опасность. Следует иметь в виду, что применение в этих целях хлора даже в небольших количествах нежелательно, а в ряде случаев просто запрещается (например конвенцией прибалтийских государств о сбросе стоков в Балтийское море). Использование хлора ведет к дополнительному засолению воды и, что даже более опасно, к появлению в стоках хлорорганики, с которой в последнее время связывается развитие онкологических заболеваний.

Учитывая это, в качестве одного из способов глубокой доочистки и обеззараживания сточных вод городских очистных сооружений, с которых происходит сброс сточных вод Санкт-Петербурга и близлежащих городов в восточную часть Финского залива, Институтом информатики и автоматизации РАН было предложено использование электронно-лучевой технологии и развернуты работы по проектированию опытно-промышленной установки доочистки для ее создания на очистных сооружениях г. Петродворца. Созданием этой установки предусматривалось решить несколько задач, а именно: приобрести опыт широкомасштабного использования новой технологии для доочистки и дополнительной дезинфекции муниципальных сточных вод, прошедших предварительную обработку на станции биологической очистки, получить реальные

данные об эффективности и экономичности технологии и работоспособности оборудования.

В ходе разработки данного проекта установки был выполнен большой комплекс различных исследований по отработке режимов облучения воды, установлению оптимальных доз облучения и определению влияния различных факторов. При этом значительные исследования были выполнены в части установления различного рода санитарно-гигиенических показателей. Систематические исследования со сточными водами Петродворца до и после облучения электронами были выполнены с привлечением соответствующих токсико-метрических, морфологических, электрофизических и биофизических методов рядом специализированных институтов Москвы. Они включали в себя оценку состояния и функционирования всех важных для живых организмов органов. Из этих исследований был сделан вывод о том, что пробы вод, подвергнутые электронно-лучевой обработке, становятся нетоксичными для гидробионтов и теплокровных животных и что обработка вызывает улучшение санитарно-гигиенических параметров и делает воду пригодной даже для хозяйственно-питьевого назначения (!). Необработанные же под ускорителем сточные воды при спаивании их теплокровным животным вызывали у них анемию и патологию печени. Показано также, что обработанная ускоренными электронами вода не оказывает раздражающего действия на кожу подопытных животных. Очень важные результаты получены в исследованиях генотоксичности проб воды до и после облучения. Показано, что электронно-лучевая обработка сточных вод не только не создает новых веществ, вызывающих генетические изменения в организме, но и способствует уничтожению уже существующих таких веществ и мутантов. Результаты санитарно-гигиенических исследований суммированы в табл. 1.

Проведенные в лабораторных условиях исследования показали, что при обработке электронным пучком муниципальных сточных вод г. Петродворца, взятых после вторичных отстойников станции аэрации, при дозе 40 крэд могут быть достигнуты показатели, приведенные в табл. 2.

Следует отметить, что эти показатели получены без учета воздействия на стоки радиолитического озона, генерируемого при прохождении электронного пучка в воздушном пространстве между фольгой выпускного устройства ускорителя и облучаемым потоком воды. И хотя при разработке проекта установки доочистки муниципальных сточных вод этот фактор не учитывался при определении производительности и эффекта очистки, тем не менее, в проекте было признано целесообразным предусмотреть комплекс мер по использованию "дарового" озона (около 140 мг/куб.м воздуха) для насыщения воды как в специальных контактных камерах вне зоны облучения (1000 куб. м/час озono-воздушной смеси на каждом ускорителе), так и непосредственно в зоне облучения (500 куб.м/час). Для максимального насыщения стоков озono-воздушной смесью была разработана специальная камера для облучения стоков, отбора из нее озона и насыщения воды озono-воздушной смесью.

В проекте установки было признано целесообразным принять технологическую схему обработки (рис3), которая предусматривала бы подачу сточной воды, прошедшей биологическую очистку, сначала в контактные камеры, в которых

**Санитарно-гигиенические исследования
муниципальных сточных вод г. Петродворца в процессе
разработки проекта установки электронно-лучевой доочистки**

Таблица 1

Исходная вода после станции аэрации

1. Содержит большое количество патогенных микроорганизмов.
2. Раздражает слизистую оболочку глаз.
3. Разрушает печень животных при поении.
4. Может содержать мутагены.

Вода после обработки электронным пучком

1. Содержит значительно меньшее количество патогенных микроорганизмов.
2. Нетоксична для гидробионтов.
3. Не содержит новых мутагенов.
4. Не содержит ранее имевшихся в воде мутагенов.
5. Не раздражает кожу.
6. Не разрушает печень животных.
7. Имеет более лучшие санитарно-гигиенические показатели в целом.

Таблица 2

Показатели
обработки муниципальных сточных вод г. Петродворца,
достигнутые в лабораторных условиях

	До облучения	После облучения
1. ХПК, мг O ₂ /л	13-28	5,2-5,8
2. БПК ₅ , мг O ₂ /л	3,5-5,0	0,5-1,0
3. Количество бактерий группы кишечной палочки (E-coli), шт./л	1x10 ² -2x10 ³ 8x10 ² -7x10 ³	1-2 <13
4. Сапрофиты, микр./мл	1-39	до 2
5. pH не более	8,0	7,6
6. СПАВ, мг/л	1,0	0,2

она подвергается предварительной очистке радиолитическим озоном. Эти камеры рассчитаны на полное поглощение озона до санитарных норм, в них микробное число может быть снижено примерно на один порядок величины. Из контактных камер вода направляется в реакционные камеры, где подвергается воздействию радиолитического озона и мощного пучка электронов от ускорителя. После этих камер вода подается самотеком в сливные каналы и затем в общий коллектор для сброса ее в Финский залив. Для интенсивного перемешивания жидкости в зоне облучения и насыщения ее озоном в зоне облучения реакционная камера снабжена

горизонтальной полкой с перфорированным днищем, под которое подается озono-воздушная смесь с расходом 500 куб.м/час.

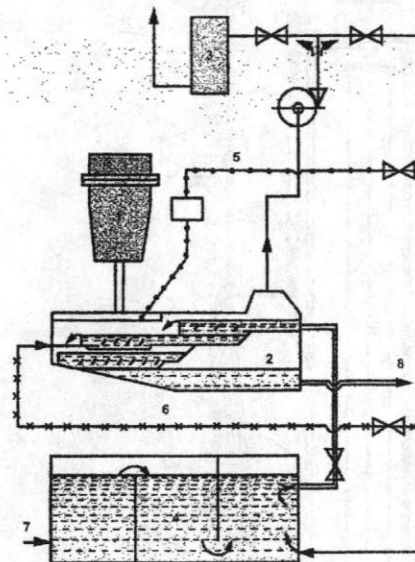


Рис.3. Принципиальная схема установки доочистки и дезинфекции муниципальных сточных вод г. Петродворца.

1-ускоритель электронов, 2-камера для электронно-лучевой обработки воды, 3- установка для каталитической очистки воздуха, 4- контактные камеры, 5-труба для отбора воздушно-озонной смеси, 7- подвод воды от городской станции аэрации, 8-сброс обработанной воды в залив.

Для станции аэрации г. Петродворца электронно-лучевая установка для дополнительной очистки и дезинфекции сточной воды города спроектирована из расчета достижения на ней полной производительности 110 тыс. куб. м/сутки, которую предполагалось реализовать в 2 этапа. Всего в

проекте предполагалось использовать 4 ускорителя ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН.

Проект установки предполагает использование на первом этапе двух ускорителей ЭЛВ-8, уже применяемых в промышленности. На втором этапе проект предусматривает использование более мощных ускорителей ЭЛВ-10, которые в то время разрабатывались ИЯФ. На рис. 4 показана схема поперечного сечения ус-

Таблица 3

**Основные характеристики
электронно-лучевой установки доочистки
муниципальных сточных вод г. Петродворца**

	1 этап	2 этап	Всего
1. Производительность куб.м/сутки			
-при дозе 30 крад	45 тыс.	95 тыс.	140 тыс.
-при дозе 40 крад	35 тыс.	77 тыс.	110 тыс.
2. Суммарная мощность ускорителей, кВт	160	400	560
3. Количество и тип ускорителей	2 x ЭЛВ-8	2 x ЭЛВ-10	4

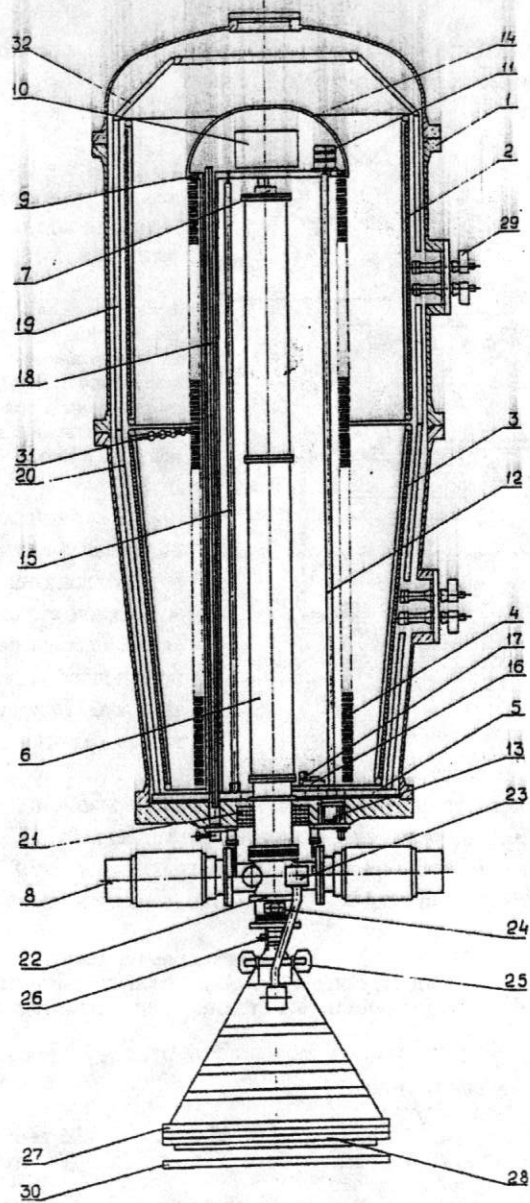


Рис.4 Электронный ускоритель ЭЛВ-8. Поперечный разрез.

корителя ЭЛВ-8. Основные характеристики установки доочистки и дезинфекции муниципальных стоков Петродворца приведены в табл. 3.

Проектом предусматривается выполнение установки в виде 4 модулей с одинаковой схемой обработки воды. Ожидается, что общее потребление электроэнергии всей установкой не будет превышать 800 кВт. Все 4 ускорителя размещаются в одном здании размером 16x27x12 куб.м, основную часть которого занимают выполненные из бетона помещения для ускорителей и реакционных камер.

УСТАНОВКА ДООЧИСТКИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД г. КИРИШИ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД АО "КИРИШИНЕФТЕОРГСИНТЕЗ"

Разработка проекта данной установки была начата по заказу АО "Киришинефтеоргсинтез", планировавшего осуществить модернизацию своих очистных сооружений. Дополнительной очистке планировалось подвергнуть два потока промышленных вод объединения и один поток муниципальных вод с общим расходом 78 тыс. куб.м в сутки. Все сточные воды, поступающие на доочистку, предварительно проходят биохимическую очистку на существующих сооружениях объединения. Установки доочистки в общей схеме очистки размещены как дополнительные конечные каскады всех потоков очистки.

В качестве технологической схемы обработки была принята схема, изображенная на рис. 5. По существу, данная схема обработки такая же как и в Петродворцовой установке. Однако в этой схеме не используются контактные камеры и вся обработка воды ведется только в пределах здания с электронно-лучевыми установками.

Технология процесса доочистки стоков состоит из следующих этапов:

- подача стоков в специальную камеру облучения,
- формирование плоского потока воды определенной толщины шириной 1,5 м,
- обработка слоя воды озono-воздушной смесью,
- обработка сформировавшегося потока воды пучком электронов,
- сброс очищенной воды.

Процесс обработки промышленных и муниципальных стоков различается только величиной поглощенной дозы, составляющей для промышленных стоков 60 крад и для муниципальных стоков 40 крад.

Выполненные в лабораторных условиях исследования показали, что обработка по принятой схеме позволяет при указанных дозах достигнуть существенного эффекта доочистки, устраняя или заметно понижая содержание в воде нефтепродуктов, аммонийного азота, СПАВ, нитратов, фенола и других веществ. При этом снижается ХПК и БПК.

Оценка возможностей установки доочистки производилась на базе ускорителей типа ЭЛВ-8М2 с основными характеристиками, приведенными в табл.4.

Киришская установка разрабатывалась для обработки стоков в объеме 78 тыс. куб. м. сутки. Для обеспечения такой производительности в ней предусматривалось использование 5 ускорителей мощностью по 150 кВт каждый.

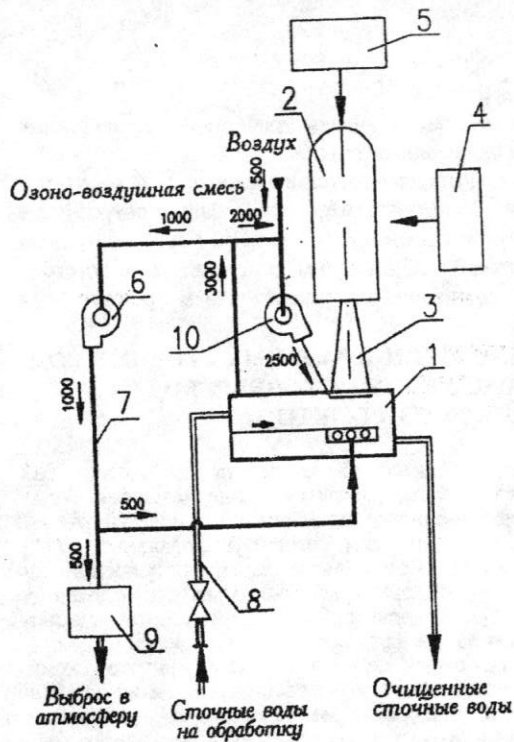


Рис.5. Принципиальная схема электронно-лучевой установки доочистки промышленных и муниципальных стоков АО «Киришинефтеоргсинтез» и г. Кириши.

1 - камера облучения технологическая; 2 - ускоритель электронов, 3 - устройство выпуска пучка в атмосферу, 4 - система энергообеспечения установок, 5- система УБС, 6- вентилятор высоконапорный 15ЦС-11, 7 - система технологической вентиляции, 8 - трассы основной технологии, 9-озонный фильтр, 10- вентилятор высоконапорный

Одновременно в работе должно быть 4 ускорителя. Пятый ускоритель служит

резервным и предназначен для обеспечения непрерывной работы установок с расчетной производительностью при профилактических работах и ремонте одного из ускорителей.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЕКТОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ УСТАНОВОК ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.

Сводка основных технико-экономических показателей электронно-лучевых установок доочистки сточных вод, проекты которых рассмотрены выше, приведены в табл. 5. Необходимо заметить, что в условиях большой экономической нестабильности трудно сопоставлять с приемлемой точностью экономические показатели, полученные в разные годы. Кроме того, следует иметь в виду также то, что на эти показатели оказали сильное влияние цены на ускорители, установленные их изготовителем. При разработке Киришского проекта (начало 1994 года) цена на ускорители была установлена в два раза ниже цен на мировом рынке ускорителей и эта цена затем была трансформирована с этим коэффициентом в цену 1984 года. При разработке Петродворцового проекта использовались цены на

Таблица 4

Основные технические характеристики ускорителя ЭЛВ-8М2, использованные при разработке проекта установки доочистки сточных вод для АО «Киришинефтеоргсинтез»

- диапазон энергий электронов, МэВ	1,5-2,5
- максимальная мощность пучка электронов, кВт	150
- ток пучка электронов, мА, не более	60
- размер выпускного окна, мм	1500x75
- потребляемая мощность, кВт	200
- расход охлаждающей воды, куб.м/ч	2
- расход охлаждающего воздуха, куб.м/ч	1000-2500
- давление элегаза, МПа (кг/см ²)	1,1 (11)
- количество элегаза на одну заправку, кг	480
- суммарная масса всех частей, кг	16250

ускорители, существовавшие на внутреннем рынке в 1990 году, когда при продаже ускорителей на внутреннем и внешнем рынках ускорителей соотношение между рублем и долларом было примерно 1:1 и ускоритель, стоивший на внешнем рынке 1 млн. долларов, на внутреннем рынке продавался за 0,85 - 1,0 млн. руб. Все это, по видимому, и породило несоответствие капитальных затрат на создание Петродворцовой и Киришской установок в ценах соответственно 1984 и 1990 годов. Данные по необходимым капитальным вложениям и эксплуатационным расходам для обеих установок в ценах, которые реально складывались соответственно в 1990 и 1994 года являются более строгими.

Из этих данных следует, что капитальные вложения на создание установки доочистки производительностью около 100 тыс.куб.м в сутки составляли примерно 7 млн. руб. в 1990 году и примерно 10 - 12 млрд. руб. в начале 1994 года. Эксплуатационные расходы по их содержанию составляют соответственно 10 и 1638 млн. руб. в год. Это позволяет определить себестоимость доочистки сточных вод в размере 0,025 и 57,5 руб./куб.м соответственно для Петродворцовой и Киришской установок на момент разработки их проектов.

Разработка двух указанных проектов установок доочистки сточных вод позволила высветить ряд научных и инженерно-технических проблем, связанных с созданием установок большой производительности и, в частности, организацией подачи воды в зону облучения с развитой турбулентностью, созданием ускорителей повышенной мощности и др. Работа над решением этих задач резко замедлилась после того как из-за резкого ухудшения экономики нашей страны и прекращением финансирования многих экологических проектов, прекратились дальнейшие работы и по указанным проектам. Несмотря на незавершенность работ по ним, опыт, приобретенный при их разработке, периодически истребуется при разработке других экологических проектов по очистке сточных вод (промышленных в зоне Ленинградской АЭС, муниципальных вод г. Воронежа и др.).

**Основные
технико-экономические показатели проектов
электронно-лучевых установок
доочистки и дезинфекции сточных вод**

Наименование показателей	Место размещения установки	
	г. Петродворец	АО" Кириши- нефтеоргсинтез" и г. Кириши
1 Количество стоков, подлежащих очистке, куб.м/сутки -промышленные -муниципальные	- до 110000	48000 30000
2 Годовое количество очищаемых стоков, тыс.куб.м/год	не регламентировано	28470
3 Количество и тип ускорителей электронов	2 ЭЛВ-8 + 2 ЭЛВ-10	5 ЭЛВ-8 (из них 1 резервный)
4 Общая мощность одновременно работающих ускорителей, кВт	ок. 560	600
5 Потребление электроэнергии, тыс.кВт-ч/год	не регламентировано	12300
6 Капитальные вложения, млн. руб.	7,2*	10380** 5733***
7 Годовые эксплуатационные расходы млн. руб.	10*	1638**
8 Себестоимость доочистки воды, руб./куб.м	0,025*	57,5**

* скорректированная стоимость с учетом цен 1990 г.

** с учетом цен и условий 1 кв. 1994 г.

*** с учетом цен и условия 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.A. Spiridonov, S.P. Buslaeva, B.M. Vanuschkin and Y.A. Panin. Treatment of Industrial and Municipal Waste waters by Electron Beam. // Chemistry for Sustainable Development, 1993, v.1, pp.259-267.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Колесников, Е. Е. Пискунова

(Государственное унитарное предприятие "Ивановский научно-исследовательский институт пленочных материалов и искусственной кожи технического назначения", Иваново)

Р. А. Салимов, Г. А. Спиридонов

(Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач в области переработки полимеров является создание принципиально новых безотходных и энергосберегающих технологий, обеспечивающих производство материалов с комплексом заранее заданных свойств.

Перспективным путем решения данной проблемы является возможность использования энергии ионизирующего излучения для модифицирования полимерных материалов (электронно-химического сшивания, прививочная полимеризация и сополимеризация модификаторов и их смесей в полимерных матрицах) и создание на этой основе электронно-химической технологии (ЭХТ) производства полимерных композиционных материалов.

Такая технология позволяет осуществлять более экономичный и более совершенный, чем любой из широко применяемых в настоящее время, способ структурирования и модифицирования полимерных материалов. Основным экономическим достоинством ЭХТ является непрерывность процесса и высокая производительность оборудования. Сильноточные ускорители электронов позволяют осуществлять процесс вулканизации со скоростью до 25-30 м/мин.

Создание и внедрение ЭХТ в производстве полимерных композиционных материалов позволяет интенсифицировать в несколько раз существующие технологические процессы, расширить ассортимент, значительно улучшить экологические характеристики технологического процесса.

ЭХТ дает возможность целенаправленно изменять свойства композиций в результате полимеризации химически активных добавок в полимерных матрицах и получать принципиально новые виды композиционных материалов на основе полимеров, трудно сшиваемых обычными термохимическими методами, и, что особенно важно, на основе смесей различных по химической природе полимеров за счет их совулканизации.

ЭХТ также позволяет формировать тонкие полимерные покрытия на различных подложках, совершенствовать процессы отделки и придания декоративно-защитных свойств выпускаемой продукции.

Эффективность применения ЭХТ в промышленности зависит главным образом от величины оптимально поглощенной дозы облучения при модифицировании полимеров и уровня физико-механических свойств получаемых материалов. В этой связи особо важное значение приобретает и выбор высокоэффективных химических добавок - модификаторов полимерных композиций. Проблема активации радиационного сшивания полимеров и их смесей с целью снижения доз облучения и получения материалов с высоким комплексом потребительских свойств является центральной в разработке ЭХТ.

Существенное влияние на свойства радиационно-модифицированных полимерных композиций оказывают целевые ингредиенты - наполнители, мягчители, антистарители, пламягасящие добавки и др. Поэтому при разработке состава полимерной композиции необходимо пользоваться определенными принципами составления рецептур с учетом этого влияния.

Проведенные в ИвНИИПИК исследования показывают, что применение ЭХТ является особенно перспективным в процессах производства полимерных композиционных материалов. Наиболее целесообразно применять радиационное модифицирование для

- повышения прочности, эластичности материалов при пониженных температурах за счет прививки полифункциональных мономеров и олигомеров в объеме полимерной матрицы;
- повышения модуля упругости, устойчивости к растворителям, маслам и другим агрессивным средам;
- повышение когезионной прочности полимерных композиций;
- повышение усиливающего эффекта наполнителей в результате прививки в них мономеров.

Таким образом, разработка научных и прикладных вопросов ЭХТ является актуальной задачей, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ РУЛОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ОБЪЕКТЫ ЭЛЕКТРОННО-ХИМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ

Для успешного применения ЭХТ в производстве полимерных композиционных материалов необходима научно обоснованная разработка рецептур сложных полимерных композиций на основе бинарных и тройных не совмещающихся полимеров, что дает возможность получать материалы, сочетающие в себе положительные свойства каждого из используемых полимеров.

Этот момент особенно важен в производстве широкого ассортимента материалов, используемых в экстремальных условиях: материалы для средств индивидуальной защиты, кровельные материалы, укрывные и тентовые материалы, обивочные и декоративно-отделочные материалы, малоусадочные пористые резины, самоклеящиеся материалы, кожеподобные материалы для низа обуви.

Для создания подобных материалов используются сложные многокомпонентные и (или) многослойные системы, состоящие из различных полимеров и их смесей и ряда целевых ингредиентов, обеспечивающих необходимый комплекс технологических, эксплуатационных и специальных свойств.

В ИВНИИПИК выполнен большой объем научно-теоретических и прикладных работ по созданию ЭХТ производства полимерных композиционных материалов, суть которых заключается в следующем:

- предложено решение проблемы ускорения реакций сшивания насыщенных и ненасыщенных полимеров и их смесей за счет образования химических связей разной природы между макромолекулами при электронно-химическом модифицировании; найдены высокоэффективные модифицирующие системы, в 3-4 раза ускоряющие процессы радиационного сшивания полимера, позволяющие в несколько раз снизить оптимально поглощенные дозы облучения и получить полимерные композиции с высокими физико-механическими свойствами;

- установлена взаимосвязь между структурой пространственной сетки полимеров, зависящей от природы и химического строения модификаторов, и физико-механическими свойствами вулканизатов и показана возможность направленного регулирования технологических, эксплуатационных и специальных свойств композиций на основе резко выраженных синергических эффектов при введении смесей моно- и полифункциональных соединений акрилового ряда в насыщенные и ненасыщенные полимеры и их смеси;

- изучено влияние целевых ингредиентов на электронно-химические процессы, протекающие в полимерных композициях с целью формирования оптимальных рецептур полимерных композиционных материалов с требуемым комплексом свойств;

- показаны пути электронно-химической совулканизации смесей полимеров, резко отличающихся по химической природе, которые обладают ценным комплексом свойств и совулканизация которых не может быть обеспечена обычным термохимическим или радиационным воздействием;

- изучены особенности формирования отделочных покрытий из жидких композиционных материалов и разработана ЭХТ декоративно-отделочных покрытий широкого ассортимента без применения органических растворителей;

- выполнен расчет и обоснован выбор ускорителей электронов для использования в промышленности и показано, что оптимальными для использования в производстве полимерных композиционных материалов являются электронно-химические установки с ускорителями электронов с энергией 0.8-1.5 МэВ и мощностью 50-100 кВт.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННО-ХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

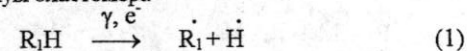
Максимальная производительность процесса радиационного модифицирования полимеров достигается, главным образом, путем снижения оптимальной поглощенной дозы облучения до минимально возможной, что обеспечивается введением в полимерные композиции специальных добавок, сенсibiliзирующих реакции, которые приводят к образованию пространственно-сшитых полимеров. В результате интенсивной прививочной полимеризации, протекающей при дозах, значительно меньших оптимальных доз для сшивания, в матрице полимера образуются узлы трехмерной сетки, содержащие отдельные молекулы или блоки ненасыщен-

ных соединений. Особенно активно участвуют в реакции трехмерной прививочной полимеризации полифункциональные ненасыщенные соединения (ПФНС) (мет)акрилового и аллилового ряда, а также малеимиды и др. Особое место среди активаторов радиационного сшивания полимеров занимают так называемые олигоэфиракрилаты (ОЭА) - сложные эфирные системы на основе дикарбоновых кислот, полиспиртов и (мет)акриловой кислоты.

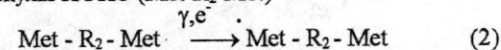
Электронно-химическое сшивание полимеров в присутствии полифункциональных соединений (ПФНС) (мет)акриловой природы происходит вследствие образования под действием излучения ряда активных центров как на основе молекул полимера, так и на основе молекул ПФНС, которые создают основу для протекания реакций прививки и сшивки. Более детально образование этих активных центров и протекающих вслед за их образованием различных процессов в системе эластомер-акриловые ПФНС после воздействия на нее ионизирующего излучения можно представить следующим образом:

- Образование активных центров при воздействии излучения

- на молекулы эластомера



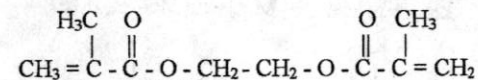
- на молекулы ПФНС (Met-R₂-Met)



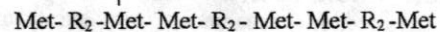
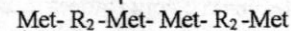
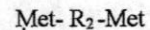
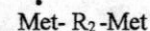
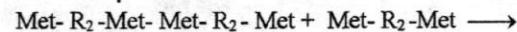
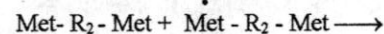
где: R₁ и R₂ - радикалы в молекулах эластомера и ПФНС;

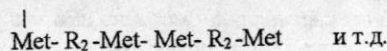
Met- радикал ненасыщенного соединения акрилового ряда;

Met - R₂ - Met- структурная формула, представляющая собой разнофункциональное (относительно количества -C=C- связей) ненасыщенное соединение акрилового ряда. Это может быть, например, этиленгликольдиметакрилат (ЭГДМ) (формула в этом случае наиболее полно отражает структуру соединения), глицеринтриметакрилат (ГТрМ) или пентаэритриттетраметилакрилат (ПЭТэТМ) с двумя, тремя и четырьмя двойными связями соответственно. Простейшая из указанных формула ЭГДМ вид:



- Взаимодействие активных центров ПФНС с образованием разветвленного или сшитого гомополимера (побочная реакция)

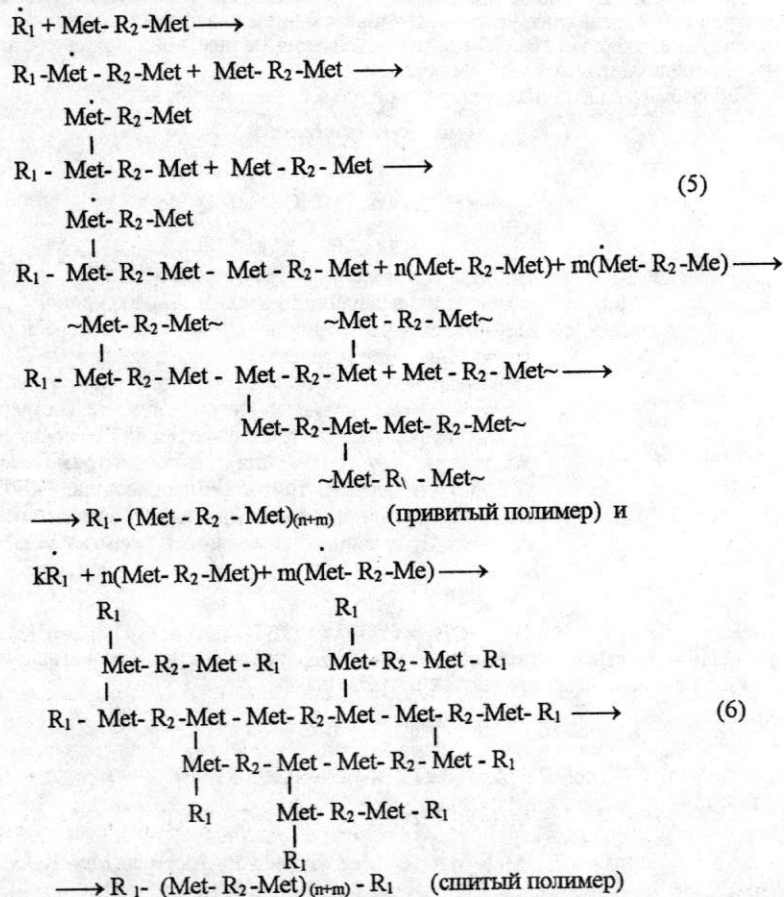




- Взаимодействие активных центров эластомера (рекомбинаций макрорадикалов) с образованием -C-C- связей между макромолекулами (сшивание):



- Взаимодействие молекул и активных центров ПФНС с макромолекулами и активными центрами эластомера с образованием или привитого или сшитого полимера:



При увеличении функциональности (относительно -C=C- связей) в молекуле ПФНС возникает еще более сложная структура пространственной сетки вулканизата, причем преобладающими реакциями в данном процессе являются

реакции получения привитого и сшитого полимера, которые определяют в конечном итоге физико-механические свойства вулканизатов.

Фазовый состав реагирующих систем, уровень распределения модификаторов, а также их полимеризация в собственной матрице и матрице эластомеров изучался методом дозиметрической сканирующей калориметрии (ДСК). Зарождение акриловых цепей на макромолекулах эластомера регистрировалось методом ЭПР. Механизм процессов радиационного сшивания химически модифицированных эластомеров изучался на примере этиленпропиленового (СКЭПП-50) и бутадиенакрилонитрильного (СКНС-40) сополимеров.

Для установления общей закономерности влияния активаторов радиационного сшивания на свойства вулканизатов изучена структура пространственных сетей в насыщенных и ненасыщенных полимерах при радиационном облучении в присутствии моно- и полифункциональных акриловых соединений различного химического строения. При этом показано, что широко используемые активаторы радиационного сшивания полимеров - олигоэфиракрилаты - снижают оптимальные поглощенные дозы облучения, но приводят к существенному ухудшению физико-механических и, особенно, эластических свойств вулканизатов, что затрудняет их использование для модифицирования полимерных композиционных материалов. Причины этого состоят в том, что увеличение числа двойных связей в молекуле приводит к избыточному росту концентрации поперечных связей и функциональности узлов пространственной сетки.

Изучен механизм радиационной полимеризации (мет)акриловых ПФНС в вязких средах эластомерных матриц. Установлена природа активных центров, иницирующих и ведущих полимерные цепи в реакциях прививочной полимеризации этих модификаторов в эластомерах. Показано, что образующиеся при облучении макрорадикалы иницируют реакции прививочной полимеризации акриловых мономеров с каучуками, а образование сшивок осуществляется через привитые (мет)акриловые цепи, что и обуславливает зависимость физико-механических свойств радиационно-химических вулканизатов от природы и химического строения модифицирующих добавок.

На основе развитых представлений о взаимосвязи между химическим строением модификаторов и свойствами вулканизатов предложен и обоснован механизм реакции сшивания ненасыщенных и насыщенных полимеров в присутствии моно- и полифункциональных производных (мет)акриловой кислоты за счет образования химических поперечных связей разной природы между макромолекулами при электронном модифицировании. Формирование таких сетчатых структур происходит в результате одновременного протекания реакций сшивания и прививочной полимеризации модификаторов в полимерной матрице. В качестве ПФНС, позволяющих формировать связи различной химической природы при радиационном сшивании эластомеров, предложен новый класс эффективных модификаторов - кристаллогидратов солей поливалентных металлов солей (мет)акриловой кислоты. Показано, что прививочная полимеризация солей в полимерной матрице происходит на границе раздела фаз макромолекула - вода - кристалл соли, а процесс образования сшитых структур осуществляется через частицы привитой полимерной соли.

Существует большое количество различных соединений, способствующих радиационному структурированию полимеров. Введение многих из них позволяет значительно увеличить плотность пространственной сетки радиационных вулканизаторов и с этой точки зрения такие соединения могут обоснованно считаться эффективными активаторами радиационного сшивания. Однако, простое увеличение густоты пространственной сетки вулканизаторов еще не является достаточным условием придания им хороших физико-механических свойств, т. к. используемые активаторы структурирования влияют на природу и характер образующейся сетки и соответственно на свойства получаемых материалов.

Очевидно, для получения при низких поглощенных дозах вулканизаторов с высокими физико-механическими свойствами необходимо, чтобы в качестве активаторов радиационного структурирования были использованы соединения, имеющие:

- во-первых, такую химическую природу, которая обеспечивала бы им высокую полимеризационную способность при воздействии малых доз ионизирующих излучений,
- во-вторых, такое химическое строение, которое позволило бы получить вулканизационную сетку, обеспечивающую наилучшие физико-механические свойства материалов.

Проведенные исследования позволили разработать способы направленного регулирования технологических, эксплуатационных и специальных свойств полимерных композиционных материалов. Для уменьшения концентрации поперечных связей и функциональности узлов пространственной сетки, образующейся при полимеризации добавок в насыщенных и ненасыщенных полимерах, предложено использовать в качестве модификаторов смеси моно- и полифункциональных (мет)акриловых соединений. Показано, что для получения вулканизаторов с наилучшими характеристиками полифункциональные узлы их пространственной сетки, образующие ПФНС, должны быть разделены привитыми цепями монофункциональных ненасыщенных соединений (МФНС) в 10-12 звеньев, т.е. на каждую двойную связь ПФНС должно приходиться 5-6 звеньев МФНС.

Радиационная сополимеризация смесей мономеров в матрице полимера позволяет регулировать состав образующегося полимера, а следовательно, и структуру пространственной сетки соотношением концентраций используемых мономеров. Соотношение сомономеров в эластомерной матрице влияет не только на прочностные и эластические свойства композиции, но и на их специальные характеристики (например: нефте- и морозостойкость, устойчивость к различным агрессивным средам и т.д.). Показано, что смеси МФНС и ПФНС (мет)акриловых соединений в 3-4 раза снижают оптимальные поглощенные дозы облучения и обеспечивают значительное повышение экономической эффективности ЭХТ производства полимерных композиционных материалов.

Расширяющиеся области использования полимерных материалов требуют сочетания взаимоисключающих свойств, которые невозможно получить в одном полимере. Создание таких материалов возможно лишь на основе смесей полимеров, т.е. за счет смешения полимеров, заметно отличающихся по свойствам. Однако практическое использование смесей полимеров встречает большие трудности, поскольку, как правило, такие полимеры не совулканизуются, а без этого - свойства

смесей неудовлетворительные. Основными причинами низких свойств материалов из смесей полимеров являются: различия скоростей вулканизации полимеров различной химической природы; различная растворимость вулканизирующих агентов в

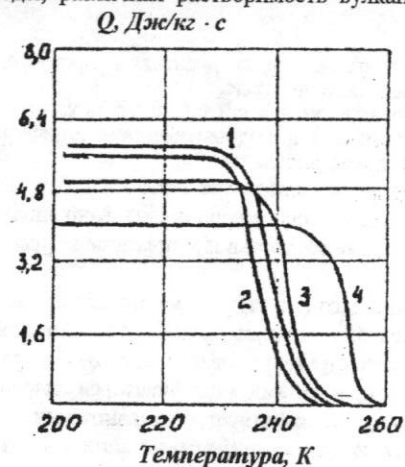


Рис. 1. Калориметрические кривые размораживания СКН-40 в присутствии модификаторов

- 1 - 5 масс.ч. Zn (МАК)₂+5 масс.ч. ЭГМ; 2 - 10 масс.ч. ЭГМ;
3 - 10 масс.ч. Zn (МАК)₂; 4 - без модификатора.

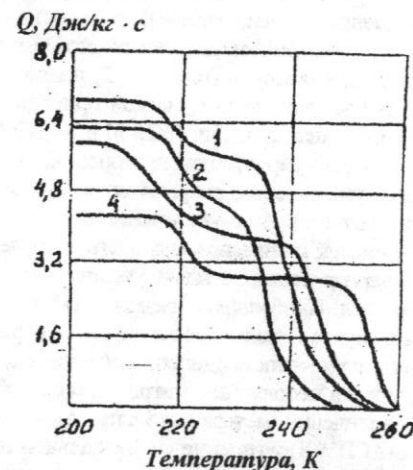


Рис. 2. Калориметрические кривые размораживания системы СКЭПТ-50 - СКН-40 (30:70) в присутствии модификаторов

- 1 - 5 масс.ч. Zn (МАК)₂+5 масс.ч. ЭГМ; 2 - 10 масс.ч. ЭГМ; 3 - 10 масс.ч. Zn (МАК)₂;
4 - без модификатора.

Физико-механические и поверхностные свойства различных типов искусственных кож и пленочных материалов с декоративно-отделочным покрытием.

Показатели	Материал армированный тентовый		Винилис-кожа Т обивочная		Эластис-кожа Т "Унифицированная"		Переплетный материал "Бумвинил"		Столовая клеенка		Пленочный материал декоративно-хозяйственный	
	серийный	с отделкой	серийный	с отделкой	серийный	с отделкой	серийный	с отделкой	серийный	с отделкой	серийный	с отделкой
Угол скольжения, град	29	25	27	25	63	35	21	15	-	-	-	-
Коэффициент трения	0,68	0,27	0,50	0,28	1,8	0,15	0,20	0,16	-	-	-	-
Истираемость, мкг/дж	46,1	12,5	59,4	45,6	22,1	91,0	-	-	21,0	11,0	-	-
Слипание, кПа	1,5	1,5	3,0	2,5	88,0	9,8	0	0	5,0	2,5	25,4	5,2
Термослипание, Мпа	-	-	0,10	0,10	-	-	0,10	0,10	-	-	0,15	0,15
Устойчивость к сухому и мокрому трению, балл	5/5	5/5	4/4	5/5	3/3	5/5	4/5	5/5	4/4	5/5	5/5	5/5
Жесткость, сН	0,35	0,40	25,5	29,0	7,9	10,6	28,6	33,3	-	-	-	-
Морозостойкость, °С	-45	-45	-40	-40	-40	-40	-	-	-	-	-	-
Устойчивость к многократному изгибу, тыс.цикл.	250	250	100	100	25	21	200	200	800	800	500	500
Степень блеска, %	2,5	2,5	1,5	1,0	11,0	0	5,0	3,0	-	-	-	-

ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУЧЕНИИ РУЛОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для создания ЭХТ производства полимерных композиционных материалов наиболее перспективными являются радиационно-химические установки (РХУ) с ускорителями электронов.

Ввиду малых толщин обрабатываемых материалов (0.1-2.0 мм) достаточными и оптимальными являются ускорители электронов с энергией 0.5-1.5 МэВ. Такой ускоритель электронов обеспечивает проведение технологического процесса со скоростью 15-30 м/мин против 2-8 м/мин на существующем вулканизационном оборудовании.

Вид и условия облучения существенным образом влияют на кинетику электронно-химических процессов, протекающих в полимерных композициях, и на свойства вулканизатов. Так при γ -облучении системы дозами 200-400 кГр требуется 10-30 часов, что объясняется сравнительно низкими мощностями доз γ -установок.

полимерах; диффузия вулканизирующих агентов в процессе вулканизации в фазу полимера с большей насыщенностью.

Практическое решение данной задачи возможно только с помощью энергии ионизирующего излучения при одновременном модифицировании композиций эффективными химическими добавками.

С целью выявления роли модификаторов в формировании свойств радиационных вулканизатов смесей полимеров исследовано влияние природы и содержания модификаторов на фазовый состав и межфазное взаимодействие в смесях полимеров.

Получение высокого комплекса свойств полимерных композиционных материалов на основе смесей полимеров различной химической природы в результате радиационно-химического структурирования обусловлено рядом факторов.

Во-первых, в присутствии модификаторов скорости гелеобразования полимеров сближаются, что способствует совулканизации компонентов полимерной смеси, в отличие от термохимической вулканизации, где эти условия не реализуются.

Во-вторых, природа акриловых соединений приводит к тому, что на стадии смешения полимеров модификаторы, подобно поверхностно-активным веществам, улучшают их взаимное распределение и способствуют формированию в смесях оптимальной структуры.

Последнее подтверждается данными калориметрии и дизелькометрии, показывающими повышение сегментальной подвижности в смесях в присутствии модификаторов. Из калориметрических кривых размораживания каучуков и их смесей в присутствии модификаторов (рис. 1 и 2) видно, что эффективность пластификации существенно зависит от химической природы эластомера, молекулярной массы и строения модификатора. Для СКН-40 и ХСПЭ было показано, что присутствие в матрицах этих полимеров модификаторов, кроме снижения температуры стеклования, приводит к уменьшению энергии активации сегментальной подвижности. Эти факторы свидетельствуют об увеличении подвижности фрагментов макромолекул, что в случае смесей полимеров способствует более эффективному совмещению - лучшему диспергированию, а также увеличению поверхности раздела фаз и объема межфазного слоя. Наибольшая "размытость" калориметрических кривых (рис. 2) наблюдается в случае использования смеси модификаторов, что свидетельствует о том, что смеси акриловых соединений обеспечивают хорошее распределение как в полярных, так и в неполярных матрицах и способствуют лучшему совмещению полимеров и увеличению межфазного слоя. Аналогичные данные получены и для систем СКЭПТ-ХСПЭ. Повышение сегментальной подвижности приводит к образованию в смесях полимеров более развитого поверхностного слоя.

В-третьих, в результате модифицирования увеличивается межфазное взаимодействие в смесях полимеров. Увеличение количества связей на межфазной границе подтверждено исследованиями адгезии отслаивания, показавшими значительный рост адгезии в модифицированных системах по сравнению с не модифицированными. В результате прививки модификаторов к макромолекулам полимеров обеспечивается возможность возникновения дополнительного межфазного взаимодействия, что создает более благоприятные условия для совулканизации фаз.

При облучении ускорителями электронов достаточно 10-20 сек, процесс сшивания проходит в атмосфере воздуха и не требует инертной среды. При использовании эффективных модификаторов и при мощностях доз 30 кГр/сек время облучения полимерной композиции составляет 2-5 сек.

Выявление оптимальных параметров радиационного процесса при использовании РХУ с ускорителями электронов является важной задачей и определяет его эффективность. К основным радиационно-химическим параметрам, характеризующим электронно-химический процесс, технологию модифицирования и конструктивные особенности аппаратного оформления, относятся:

- поглощенная доза и ее распределение в объекте;
- размеры и форма облучаемого объекта;
- плотность объекта и его состав;
- скорость передачи материала в рабочую зону камеры облучения;
- номинальная энергия пучка ускоренных электронов;
- средний ток электронного пучка;
- размеры выпускного окна развертывающего устройства ускорителя;
- коэффициент использования ионизирующего излучения;
- мощность ускорителя;
- производительность установки;
- специальные технологические требования к процессу (температура нагрева, среда облучения, требования к мощности дозы и т.п.).

Из приведенных параметров процесса особое значение имеет поглощенная облучаемого объекта. Зная распределение поглощенной дозы в материале и его доза и ее распределение в объеме параметры, можно выбрать оптимальные режимы работы ускорителя, технологические условия. При оптимизации распределения доз в облучаемом материале задача сводится к правильному выбору способа облучения, нахождению оптимальной толщины облучаемого материала, определению оптимальной энергии электронного пучка и вычислению потерь энергии на фольге, воздухе и материале. При энергии пучка электронов более 0.8 МэВ соотношение между энергией и толщиной облучаемого материала для исследуемых полимерных материалов линейно и может быть вычислено по формуле:

$$E(\text{МэВ}) = k \cdot h_{\text{опт}} + 0.32, \quad \text{где} \quad (7)$$

k - коэффициент, учитывающий форму кривой глубинного распределения в зависимости от свойств полимерного материала,

$h_{\text{опт}}$ - оптимальная радиационная толщина (поверхностная плотность) облучаемого материала при условии равенства входной и выходной доз, г/см².

Приведенное выражение и выполненные расчеты для определения энергии ускоренных электронов в зависимости от толщины облучаемого материала относятся к пучку ускоренных электронов, падающему перпендикулярно на поверхность материала. При облучении материалов шириной до 2 м пучок ускоренных электронов, развернутый в полосу, падает на облучаемый материал под некоторым углом α . Поэтому, естественно, увеличивается оптимальная толщина на краях материала и соответственно энергия электронов должна быть увеличена на ту же величину.

$$H_{\text{опт(кр)}} = \frac{h_{\text{опт}}}{\cos \alpha}, \quad (8)$$

где α - угол падения электронного пучка на краях облучаемого материала.

Как правило, при конструировании развертывающих устройств угол α не превышает 20°, тогда

$$h_{\text{опт(кр)}} = 1,6 h_{\text{опт}} \quad (9)$$

Весьма важной характеристикой, определяющей эффективность РХУ, является коэффициент использования пучка ускоренных электронов ($\eta_{\text{общ}}$), который зависит от многих факторов и представляет собой произведение частных коэффициентов:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_r \cdot \eta_{\text{ом}} \cdot \eta_{\text{разв}} \cdot \eta_k \cdot \eta_n, \quad \text{где} \quad (10)$$

η_r - характеризует потери энергии по толщине облучаемого материала;

$\eta_{\text{ом}}$ - учитывает отражение пучка от поверхности материала;

$\eta_{\text{разв}}$ - учитывает потери мощности на краях развертывающего устройства;

η_k - учитывает падение электронного пучка на краях материала под углом α ;

η_n - учитывает нестабильность параметров электронного пучка и системы транспортирования материала.

Полученные значения коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты потери энергии электронного пучка.

Энергия электронов МэВ	η_r	$\eta_{\text{ом}}$	$\eta_{\text{разв}}$	η_k	η_n	$\eta_{\text{общ}}$
0.3	0.30	0.95	0.90	0.87	0.96	0.22
0.5	0.56	0.95	0.90	0.88	0.96	0.40
0.8	0.80	0.97	0.90	0.92	0.96	0.61
1.0	0.82	0.98	0.90	0.92	0.96	0.63
1.5	0.84	0.96	0.90	0.93	0.96	0.64
2.0	0.87	0.98	0.90	0.93	0.96	0.66

Выбрав оптимальную энергию электронного пучка, зная необходимую величину поглощенной дозы, размеры облучаемого материала, можно рассчитать мощность ускорителя и производительность РХУ:

$$V = 60 \cdot \frac{P_y}{D \cdot \rho \cdot h \cdot l} \cdot \eta_{\text{общ}}, \quad \text{м/мин, где} \quad (11)$$

h - толщина облучаемого материала, м;

l - ширина облучаемого материала, м;

ρ - плотность материала, кг/м³;

D - доза облучения, кГр.

P_y - мощность ускорителя, кВт

На базе выполненных исследований разработана совместно с ИЯФ СО РАН, изготовлена и пущена в эксплуатацию в опытно-промышленном производстве ИВНИИПИК опытно-промышленная линия по производству полимерных композиционных материалов с ускорителем электронов ЭЛВ-2.

На рисунке 5 приведена схема процесса производства электронно-модифицированных полимерных композиционных материалов по каландровой технологии.

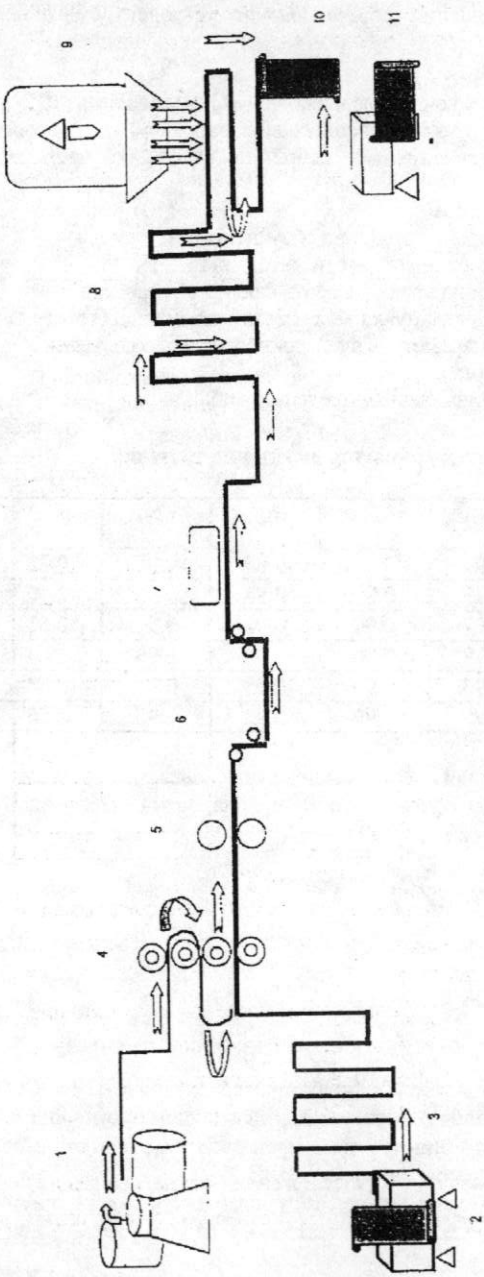


Рис. 5. Схема технологического процесса производства рулонных полимерных композиционных материалов

1-участок приготовления смеси; 2-размоточное устройство; 3-компенсаторы;
4-каландр; 5-уплотнительно-гидрильная пара; 6-охлаждающие барабаны; 7-отделочное устройство; 8-компенсаторы; 9-ускоритель электронов; 10-намотка готовой продукции; 11-участок разбраковки и упаковки готовой продукции.

Анализ данной схемы показывает, что ускорители электронов хорошо вписываются в непрерывный каландровый поток производства полимерных композиционных материалов, не требуют дополнительного технологического оборудования.

Аналогичные линии пущены в эксплуатацию на АО "Кировский комбинат искусственных кож" с ускорителем электронов ЭЛВ-6, Уфимском заводе РТИ с ускорителем электронов ЭЛВ-8, АО "Ивановский КИП" с ускорителем электронов "Электрон-10М".

В Табл.4 в качестве примера приведены сравнительные технико-экономические показатели электронно-химической и термохимической технологий производства эластомерного рулонного кровельного материала.

Таблица 4

Сравнительные технико-экономические показатели электронно-химической и термохимической технологий производства эластомерного рулонного кровельного материала.

Наименование показателей	Электронно-химическая технология	Термохимическая технология
Характеристика процесса	непрерывный; поточная линия	периодический
Скорость процесса, м/мин	1.5-8	1-2
Капитальные затраты на оборудование на объем выпуска 2 млн. кв. м, млн. руб. (в ценах 1991 г.)	0.773	2.07
Снижение энергозатрат, квт.ч/1000 м ²	170*	-
Снижение теплотрат, Гкал/1000 м ²	5,5*	-
Снижение численности основных рабочих на объем выпуска 2 млн. кв. м	1,5-2 раза*	-
Уменьшение производственных площадей на объем выпуска 2 млн. кв. м	4 раза*	-
Срок окупаемости технологической линии	1.5-2 года	

* все по сравнению с термохимической технологией

В процессе работы по созданию электронно-химической технологии была решена проблема ускорения реакции сшивания насыщенных и ненасыщенных полимеров их смесей; а также

- найдены высокоэффективные модифицирующие системы, позволяющие в 3-4 раза снизить оптимальные поглощенные дозы облучения и получить полимерные композиции с высокими физико-механическими свойствами;

- изучено влияние целевых ингредиентов на электронно-химические процессы, протекающие в полимерных композициях;

- показана возможность направленного регулирования технологических, эксплуатационных и специальных свойств композиций, с целью формирования опти-

мальных рецептур для полимерных композиционных материалов с требуемыми характеристиками,

- показаны пути электронно-химической совулканизации смесей полимеров, резко отличающихся по химической природе, которые обладают ценным комплексом свойств и совулканизация которых не может быть обеспечена традиционным термохимическим или радиационным воздействием;

- произведен расчет и обоснован выбор ускорителей электронов для использования в промышленности искусственных кож.

Полученные в ходе теоретических исследований результаты послужили основой для разработки и практической реализации высокоэффективной электронно-химической технологии полимерных композиционных рулонных материалов.

Эффективность электронно-химической технологии заключается в следующем:

- интенсифицирование в 2-3 раза существующих технологических процессов производства искусственных кож за счет высоких скоростей структурирования полимерного покрытия под действием ионизирующего излучения (время облучения 1-3 сек. вместо 10-20 мин. при термической вулканизации);

- уменьшение в 10-15 раз теплоэнергетических затрат за счет замены существующего энергоемкого вулканизационного оборудования высокопроизводительными установками с ускорителями электронов;

- снижение в 5-7 раз энергетических затрат за счет исключения наиболее энергоемких операций из производственного цикла, в том числе процесса рекуперации растворителей;

- снижение на 20-50% материалоемкости продукции за счет формирования тонких полимерных слоев непосредственно на подложке;

- сокращение в среднем на 50% занимаемых производственных площадей;

- сокращение отходов и снижение потерь сырья в процессе производства, уменьшение количества вспомогательных материалов;

- улучшение экологических показателей производства и условий труда работающих за счет снижения температур на всех производственных операциях до комнатных, а также исключения растворителей и других токсичных и взрывоопасных ингредиентов.

Разработанная технология позволяет использовать типовое прерабатывающее оборудование - валковое или наносное и получать высококачественную продукцию с комплексом заданных потребительских свойств.

Разработанная электронно-химическая технология искусственных кож защищена 40 авторскими свидетельствами СССР и патентами Российской Федерации.

Ежегодно по ЭХТ на существующих линиях промышленностью выпускается порядка 110 тыс. квадратных метров рулонных полимерных композиционных материалов различного назначения.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВНЕ ВАКУУМА ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ ФОСФОРОМ И БОРОМ.

Н. В. Алексеева, В. Л. Ауслендер, Н. А. Горбунова, В. А. Горбунов.
(Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск)

Среди технологических процессов изготовления полупроводниковых (ПП) структур заметную долю составляют операции, требующие высокотемпературного нагрева материалов (загонка и разгонка примесей, отжиг дефектов, геттерирование и т.п.). При этом часто последующая термическая операция неблагоприятно влияет на результаты предыдущей обработки. Длительные многократные термические воздействия приводят к размыванию профиля примеси равнозначно по всем направлениям от центра повышенной концентрации.

Принципиально радиационно - стимулированная диффузия может помочь в разрешении технологических противоречий, т.к. позволяет сокращать время и температуру обработки [1,2]. Однако, этот технологический процесс все еще остается в стенах лабораторий из-за малой технологической освоенности.

Иные возможности открываются с применением ускорителей электронов промышленного назначения, которые позволяют облучать ПП пластины в воздушной или газовой среде при нормальных условиях равномерно по всей толщине с интенсивностью, при которой температура пластин поднимается до 600-1300°C за время около 1 минуты и далее контролируется с высокой точностью.

В настоящей работе на примере легирования кремния фосфором и бором сопоставляются основные параметры ПП структур, полученных традиционным термическим и, предложенным авторами, радиационно - термическими способами. Радиационно - термическая обработка состоит из облучения в нормальных условиях пластин кремния потоком ускоренных электронов с энергией 0.7-2 МэВ и плотностью тока в зоне облучения 0.01-0.1 мА/см². При правильно выбранной энергии электронов облучение производится по всей толщине пластины с высокой однородностью. Коэффициент преобразования кинетической энергии электронов в тепловую близок к 1. Поскольку энергия электронов лежит ниже порога фотоядерных реакций облучаемых материалов, то в пластинах после радиационно - термической обработки принципиально не возникает наведенной активности.

В качестве экспериментального материала выбраны кремневые пластины КДБ-10 и КЭФ-0.5, широко используемые в отечественном ПП производстве. Источниками легирующих примесей являлись жидкие диффузаны в виде различных соединений бора и фосфора.

Источником ускоренных электронов в работе служил импульсный линейный ускоритель типа ИЛУ-6 [3], разработки Института ядерной физики СОРАН. Этот ускоритель дает пучок электронов с энергией 1.2-2.5 МэВ при среднем токе ускорения электронов до 17 мА. Во времени пучок представляет собой последовательность прямоугольных импульсов длительностью около 0.5 мс, следующих с частотой 50 Гц. Пучок электронов выходит из выпускного тракта в

атмосферу к облучаемому объекту через окно, закрытое титановой фольгой. Выпускное устройство осуществляет сканирование пучка так, что средняя плотность тока в зоне облучения имеет высокую однородность.

Таблица 1.

Изменение поверхностного сопротивления (R_s) и деструктивные изменения поверхности (ямки травления) в зависимости от режима обработки пластин КДБ-10 и КЭФ-0.5

№ п/п	Режим обработки	Коэффициент возрастания поверхностного сопротивления R_s	Распределение ямок травления
1	рад.-терм., 1000°C, 10 мин	1,3	ямки нет
2	рад.-терм., 1000°C, 10 мин; травление	-	одиночные ямки
3	терм., 1000°C, 10 мин	1,3	ямки нет
4	терм., 1000°C, 10 мин; травление	-	группы дефектов
5	рад.-терм., 1000°C, 10 мин + терм., 850°C, 40 мин; травление	-	поля ямок

Пластины с нанесенным диффузантом устанавливались под выпускным устройством на теплоизолятор обычно одна над другой, рабочими поверхностями друг к другу. Температура контролировалась термопарой, установленной под пластинами. При известных параметрах электронного пучка и величины тешлостока с пластины, имеется однозначная связь между током пучка, температурой образца и мощностью дозы облучения. На этом основании в экспериментах оказалось достаточным контролировать только температуру образца, ток и энергию пучка и время обработки.

Обследование свойств исходных и облученных материалов, параметров профилей введенных примесей и характеристик р-п переходов осуществлялось стандартным для ПП технологий набором устройств и методик.

Контроль структурных дефектов в облученных пластинах проводился методом растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ) и измерением поверхностного сопротивления четырехзондовым методом. Оценки глубины залегания полученных р-п переходов осуществлялась методом шарового шлифа. Профили распределения примесей исследовались методом вторично - ионной масспектрологии (ВИМС), а для примеси фосфора, кроме того, еще и методом нейтронно - активационного анализа. Оценка степени активации введенной примеси проводилась емкостной методикой по С-V характеристикам. Для оптических методов контроля отдельные образцы обрабатывались в селективном травителе Сиртля и просматривались в электронном микроскопе с увеличением до 5000 раз.

В таблице 1 приведены сравнительные результаты исследования деструктивных изменений поверхности и изменений поверхностного сопротивления пластин КДБ-10 и КЭФ-0.5, обработанных традиционным термическим и радиационно-термическим методами. Электронно-оптическим методом на поверхности пластин наблюдаются ямки травления, причем с большей плотностью на образцах, подвергавшихся дополнительному термическому отжигу после радиационно-термической обработки. Однако, существенных структурных изменений при облучении не происходит, что подтверждают и электронограммы, полученных на этих же образцах до травления. Поэтому, можно считать, что радиационно-термическая обработка не приводит к возникновению в структуре кремния дополнительных электроактивных дефектов (по сравнению с термической обработкой).

Серьезным моментом при формировании ПП структур является маскирование, которое осуществляется слоем окисла кремния. Коэффициент диффузии бора и фосфора в окисле кремния на несколько порядков ниже, чем в кремнии. Этот эффект относительной разницы коэффициентов диффузии на фоне возрастания их абсолютных значений остается в силе и при радиационно-термической обработке, что установлено экспериментально. Пластины с фиксированным значением R_s окислялись в печи (толщина окисного слоя достигала 0.5 мкм), затем наносился поверхностный диффузант и проводилась радиационно-термическая обработка при температуре 1140-1150°C в течение 10 мин. После стравливания диффузанта и окисного слоя по контролируемым значениям R_s видно, что диффузия бора и фосфора исключена на участках, закрытых окисным слоем. Следует отметить, что при временах радиационно-термической обработки порядка одного часа на электронограммах появляется картина, свидетельствующая о возникновении поликристаллической фазы в окисном слое. Отсюда следует, что длительность процесса формирования ПП структур предлагаемым способом не должна превышать 30-40 минут.

В таблице 2 приведены данные приповерхностной концентрации примесей и глубины залегания р-п перехода в зависимости от температуры радиационно-термической обработки длительностью 5 минут. Видно, что за это время можно получить переходы в кремнии глубиной до 0.5 мкм с высокой (до 10^{21} частиц/см³) концентраций примеси в приповерхностном слое.

На рис.1 изображены профили распределения фосфора в кремнии, полученные методом ВИМС и подтвержденные методом нейтронно-активационного анализа. Все профили сформированы в течении 5 минут при различных температурах обработки. Из характера профилей распределения примесей видно, что низкотемпературной, практически чисто радиационной, обработке соответствует очень мелкий (0.1 мкм) и резкий (более чем 2 порядка значения уровня концентрации на 0.1 мкм) р-п переход. С ростом температуры обработки глубина залегания перехода возрастает до 1 мкм, градиент концентрации при этом достигает трех порядков на 1 мкм глубины. Длительное время радиационно-термической обработки приводит к возрастанию глубины залегания перехода до 3 мкм и более с сохранением высокой крутизны фронта профиля (Рис.2).

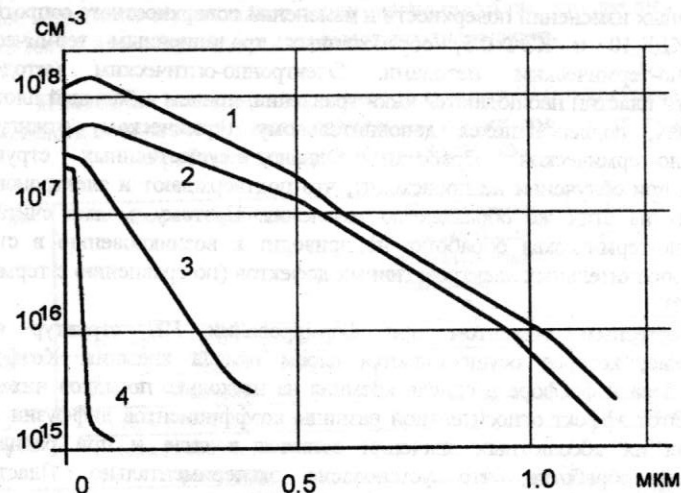


Рис. 1. Профили распределения примеси фосфора в кремнии (ВИМС).

Время обработки 5 мин. для всех режимов.

- 1- E=1,7 МэВ, T=1100°C;
- 2- E=1,7 МэВ, T=1000°C;
- 3- E=1,6 МэВ, T=900°C;
- 4- E=1,2 МэВ, T=600°C.

Исследование профилей концентрации примеси методом C-V характеристики, методом, который позволяет определить концентрацию электрически активной части примеси, говорит о высокой степени их активации.

Таблица 2.

Приповерхностная концентрация примесей и глубина залегания p-n перехода в зависимости от температуры радиационно-термической обработки (продолжительность обработки 5 минут).

№ п/п	Температура при радиационно-термической обработке, °C	Поверхностное сопротивление	Концентрация примесей в приповерхностном слое, частиц/см³	Глубина залегания p-n перехода (мкм)
1	1260	44	10 ²¹	0.5
2	1100	150	10 ²⁰	0.5
3	890	489	10 ¹⁸	0.15
4	600	3140	10 ¹⁷	0.15

В таблице 3 приведены сравнительные электрофизические параметры диодных структур, сформированных термическим и радиационно-термическим методами и их комбинаций. Видно, что радиационно-термический способ обработки позволяет повысить не только крутизну ВАХ прибора в 4-5 раз, но и пробивное напряжение в 2 раза. Особенно высокое пробивное напряжение (100-130 В) показали образцы, прошедшие следующий технологический цикл: загонка в печи (1000°C, 30 мин.); разгонка радиационно-термическая (600°C, 10 мин.); отжиг в печи (1000°C, 10 мин.).

Таблица 3.

Крутизна ВАХ и величина пробивного напряжения p-n переходов, сформированных термическим (терм.) и радиационно-термическим (рад.-терм.) методами (пластина КЭФ - 0.5)

№ п/п	Загонка	Разгонка	Отжиг	Крутизна ВАХ, мА/В	Напряжение пробоя, В
1	терм., 1000°C, 30 мин.	терм., 1000°C, 30 мин.	нет	0.5-0.6	25
2-1	терм., 1000°C, 30 мин.	рад.-терм., 600°C, 10 мин.	нет	2	25
2-2	терм., 1000°C, 30 мин.	рад.-терм., 600°C, 10 мин.	терм., 1000°C, 10 мин.	2	100-130
3-1	терм., 1000°C, 30 мин.	рад.-терм., 1000°C, 5 мин.	нет	3	40-50
3-2	терм., 1000°C, 30 мин.	рад.-терм., 1000°C, 5 мин.	терм., 1000°C, 10 мин.	3	40-60
4-1	рад.-терм., загонка-разгонка в одном цикле, 600°C, 10 мин.		нет	2-2.5	20-30
4-2	рад.-терм., загонка-разгонка в одном цикле, 1000°C, 5 мин.		рад.-терм., 1000°C, 10 мин.	2-2.2	40-55

Таким образом, радиационно-термический способ обработки кремния позволяет:

- ускорить процесс формирования p-n перехода в 5-10 раз;
- снизить температуру основных технологических операций до 600°C;
- совместить в одной технологической операции процессы загонки и разгонки примесей, а также получение стеклообразных соединений диффузантов на поверхности ПП пластин;
- получить мелкие, резкие переходы глубиной до 0.1 мкм с градиентом концентрации 2-3 порядка;
- повысить электрические характеристики диодных структур.

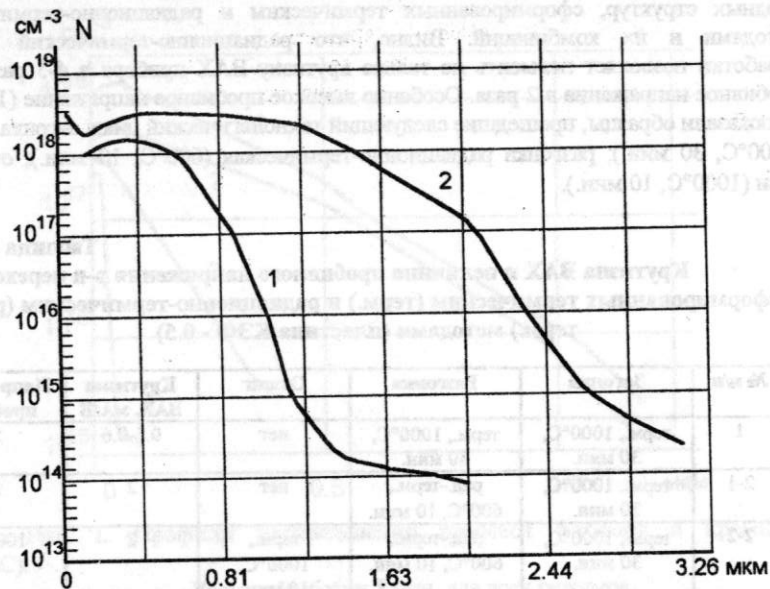


Рис. 2. Профиль распределения примеси бора в кремнии (ВИМС).

$E=1.7$ МэВ, $T=1000^{\circ}\text{C}$,
 $1-\tau=15$ мин., $2-\tau=50$ мин.

Заменой диффузионной печи на ускоритель электронов повышает "гибкость" и универсальность технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко. Исследование влияния высокотемпературного электронного облучения на p-n переходы в кремнии. Изв. АН БССР, сер. физ. - мат. наук, 1975, № 3, стр. 110-114.
2. Pfister I. S. Radiation Enhanced Diffusion in Silicon - In Radiation Damage in Semiconductors. Paris - Royaumout, Dunod, 1965, pp. 281-285.
3. В. Л. Ауслендер, В. А. Поляков, В. Е. Нехаев и др. Ускоритель электронов типа ИЛУ для промышленных технологий. Пучковые технологии, I Международный симпозиум "Пучковые технологии", 1995 г..

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЁРДЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В. Л. Ауслендер

(Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера
 Сибирского отделения Российской академии наук)

И. Г. Бочкарев

(Институт горного дела
 Сибирского отделения Российской академии наук)

А. П. Воронин

(Институт химии твердого тела
 Сибирского отделения Российской академии наук)

Развитие многих отраслей техники, определяющих научно-технический прогресс и выход их на качественно новый уровень производства, уже невозможен только за счет модернизации существующих технологий неорганического материаловедения. Возникает потребность в нетрадиционных подходах к решению проблем, к использованию последних достижений фундаментальных наук. Одной из таких проблем является низкая скорость взаимодействия в твердофазных реакциях неорганического синтеза. В настоящее время интенсивно ведется поиск путей интенсификации диффузионно-контролируемых реакций и все больше внимания привлекает к себе использование в высокотемпературных процессах синтеза ионизирующего излучения.

Наиболее перспективными источниками ионизирующего излучения рассматриваются ускорители электронов, которые выгодно отличает:

- широкий диапазон и простота регулирования параметров излучения (мощность, энергия электронов, характеристика развертки и пр.);
- экономичность, благодаря высокому КПД передачи кинетической энергии электронного пучка непосредственно в реагирующее вещество;
- отсутствие наведенной радиоактивности в облучаемых материалах (при $E_{эл} < 5$ МэВ).

Взаимодействие интенсивного потока электронов с неорганическими твердыми телами приводит к возбуждению электронной и ядерной подсистем облучаемого материала. В результате релаксационных процессов энергия первичного излучения трансформируется, главным образом, в энергию тепловую, вызывая нагревание вещества. При этом, как показывают экспериментальные данные [1-3], воздействие электронного пучка на многие химические системы не сводится к чисто термическому. Экспериментально доказано активирующее воздействие электронного пучка даже в области высоких ($>1000^{\circ}\text{K}$) температур, где казалось бы, эффект

должен гасится быстрой релаксацией радиационных повреждений кристаллической структуры.

Такие высокотемпературные процессы, в которых ионизирующее излучение является единственным источником энергии, получили название радиационно-термические (РТ). Они протекают только при наличии термической активации (нагревание), что отличает их от радиационно - химических процессов в классическом понимании. Для нагревания неорганического вещества до температуры 1000 К и выше необходим источник излучения, обеспечивающий ввод энергии в объем вещества на уровне 10 Дж/с·г, то есть не менее 1 Мрад/с. В настоящее время для этих целей в экспериментальных работах успешно используются промышленные ускорители электронов ИЯФ СОРАН типа ИЛУ-6, ИЛУ-10 [4].

За последние два десятилетия с использованием этих установок проведены многочисленные эксперименты по широкому спектру химических систем и процессов твердофазного взаимодействия. Главной целью исследования становилось выяснение природы и механизма РТ - процессов, особенности влияния мощного электронного пучка на твердое вещество, излучение кинетических характеристик химических превращений. Принимая во внимание новизну исследований, большое внимание уделялось и поиску радиационно - чувствительных систем и процессов. Расширение круга объектов исследования полезно для более полного понимания и систематизации опытных данных.

Следует отметить, что до недавнего времени в теоретической литературе отсутствовали сведения о взаимодействии ионизирующего излучения с неорганическими веществами при высоких температурах. Это объясняется тем, что в области высоких температур на процесс накопления радиационных дефектов накладывается процесс термической релаксации возбужденных электронных состояний, точечных и пространственных дефектов структуры [5, 6]. Время жизни радиационных дефектов при $T > 1000^\circ\text{K}$ не превышает 10^{-7} с. Это создает значительные методологические трудности, препятствующие накоплению экспериментального материала.

Тем не менее, известен ряд специфических воздействий ионизирующего излучения на вещество, которые могут проявить себя в изменении кинетики и механизма высокотемпературных процессов.

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ.

При облучении в объеме вещества генерируется большое число возбужденных электронных состояний. При достаточно большой мощности дозы их концентрация может достигать $10^{18}-10^{20}$ ед./см³. В отсутствие процессов автолокализации они могут мигрировать, а их термическая релаксация будет происходить на стоках, в качестве которых могут выступать поверхность раздела фаз, границы зерен, точечные и пространственные дефекты кристаллической структуры. Это может привести к локальному перегреву, достигаемому по оценкам 200-500°K по сравнению со средней температурой образца. В результате резко

интенсифицируются процессы массопереноса. Возбужденные электронные состояния также могут распадаться с образованием точечных дефектов структуры (Френкелевские пары). Если их время жизни достаточно велико, они тоже дают вклад в валовой диффузионный процесс.

Тормозящийся в веществе электрон может создавать локально перегретые области и в поле своего трека. Размер такой области может достигать 10^4 \AA , а перегрев - до 500°K .

Высокая концентрация дефектов электронной подсистемы способна изменить механизм и активировать процессы взаимодействия с переносом заряда. А такие процессы широко распространены в химии твердого тела: термическое разложение, массоперенос в веществах нестехиометрического состава.

Облучаемые диэлектрики способны накапливать большой объемный заряд, что приводит к пробое. Отсюда вытекает ряд явлений, свойственных веществу в сильных электрических полях, в том же числе и активация некоторых высокотемпературных реакций [7].

Нельзя исключить и генерацию точечных дефектов за счет упругого взаимодействия ускоренных электронов с атомами вещества. Как правило, энергии релятивистских электронов достаточно для преодоления пороговой энергии образования точечных дефектов в металлах и полупроводниках.

Конечно, для каждой конкретной системы те или иные механизмы могут быть существенными, а могут и не играть роли. Возможно, что в ряде случаев влияние электронного пучка сводится к чисто термическому эффекту.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ.

Специфика термического воздействия заключается во вводе энергии непосредственно в объем облучаемого вещества, а также в достижении высоких скоростей нагревания, до 200 К/с. Последнее, как правило, интенсифицирует высокотемпературных процесс, подавляя процессы пассивации и рекристаллизации промежуточных и исходных фаз, вплоть до смены лимитирующей стадии процесса.

МЕТОДИКА РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.

Проведение кинетических экспериментов потребовало разработки соответствующих методик температурных и дозовых измерений [8]. Одним из критериев, характеризующим условия эксперимента, является равномерное облучение образца и контроль за мощностью поглощенной дозы Р. В радиационно-термических (РТ) экспериментах, как правило, $R > 1$ Мрад/с, что не позволяет использовать традиционные химические и жидкостные дозиметры. В наших экспериментах доза определялась по току пучка ускоренных электронов. Ток пучка измерялся многосекционным графитовым датчиком тока. Выбор графита был обусловлен малым коэффициентом отражения ~ 2% для электронов с энергией 1.5-2.0 Мэв. Относительная точность измерения $\pm 2\%$.

Определяющим параметром проведения высокотемпературных экспериментов является температура. Отсюда вытекает необходимое условие РТ - экспериментов - точная и непрерывная фиксация температуры. Здесь имеются определенные методические трудности, связанные с объемным распределением температуры вследствие неравномерного поглощения энергии электронов по толщине образца. Способы формирования равномерного объемного распределения температуры и методика температурных измерений подробно описаны в работе [8].

Следует отметить, что из известных методов регистрации температуры (спектроскопический, калориметрический, пирометрический и др.) наиболее пригодным оказался термопарный. Спай термопары (Pt-Pt+10% Rh) вводится непосредственно либо в объем рабочего образца, либо в образец - "свидетель" на уровне массовой толщины, где находится максимум энерговыделения электронного пучка при торможении в среде. Использование тонких (30-50 мкм) термопар или более толстых, но с фольгированным спаем, позволяет устранить ошибку измерения из-за перегрева спая термопары. Градуировка термопар при облучении проверялась по температурам плавления солей Na_2CO_3 (1126°K), NaFeO_2 (1593°K), CaF_2 (1653°K) и др. Точность показаний исследовалась в интервале мощности поглощенной дозы до 20 Мрад/с. Регистрируемая температура отличалась от истинной не более чем на $\pm 5^\circ$. Для устранения паразитных ЭДС в цепи термопары использовалась схема подавления помех (интегрирующая RC-цепочка), а в отдельных случаях заземлялся спай термопары [8].

Оценка результатов радиационно-термических экспериментов производилась путем сравнения с данными термических опытов. Имеющиеся литературные данные по печным отжигам рассматривались лишь в качестве вспомогательного материала. Действительно, для получения достоверной информации о величине радиационно-термического эффекта эксперименты сравнения необходимо проводить в максимально близких температурно-временных условиях. Причем допускается использование образцов только одинаковой химической и методической "биографии".

Результаты

Исследование влияния мощного электронного облучения ($E=1.5\pm 2.5$ Мэв, $P=1\pm 3$ Мрад/с, $I=2-10$ mA) производилось для широкого круга неорганических систем, высокотемпературные взаимодействия в которых (фазаобразование, спекание) являются определяющими в технологических процессах неорганического синтеза. Так, BaTiO_3 находит широкое применение для получения сегнетокерамики, ферриты Ba и Sr - исходный материал для ферромагнитных изделий, а молибдаты и вольфраматы стронция и свинца используются в изготовлении люминофоров и термомиттеров.

В таблице 1 представлен перечень химических систем, в которых отмечен эффект радиационно-термической активации процессов взаимодействия.

Величина эффекта и его зависимость от температуры различна в данных химических системах. Скорость синтеза под действием пучка ускоренных элек-

тронов увеличивается от 2-4 раз для систем $\text{AO-B}_2\text{O}_3$ ($A=\text{Pb, Sr, B}=\text{Mo, W}$) до десятков раз в системе CaO-SiO_2 (Рис.1, 2). Данные кинетических исследований на порошковых смесях подтверждаются и прямыми экспериментами по изучению радиационно - стимулированной диффузии [21, 22]. В модельных экспериментах образования шпинелей ZnFe_2O_4 и NiAl_2O_4 параболическая константа скорости реакции увеличивается в 2-5 раз при облучении электронами. То есть, налицо интенсификация именно диффузии реагента через слой продукта реакции. Аналогичные количественные данные получены и по радиационно - стимулированной само - и гетеродиффузии в металлических системах, на примере Cu, Ag и диффузии Cu в Al [21, 23].

Таблица 1.

Исследованные химические системы.
Реакции в твердотельном состоянии, ускоренные в радиационно-термическом процессе.

	System	Product	Paper
1	$2\text{CaO}+\text{SiO}_2$	Ca_2SiO_4	[9]
2	$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	2NaFeO_2	[10]
3	$\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$	2NaAlO_2	[10]
4	$\text{CaO}+\text{NaAlSiO}_4$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{NaAlO}_2$	[11]
5	$\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$	cement	[11], [12]
6	$\text{BaCO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	[13], [14]
7	$\text{SrCO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	[14], [15]
8	$2 \text{BaCO}_3+ \text{SrCO}_3+\text{WO}_3$	Ba_2SrWO_6	[15]
9	$\text{SrMoO}_4+\text{SrWO}_4$	$\text{Sr}(\text{Mo, W})\text{O}_4$	[15]
10	$\text{PbO}+\text{MoO}_3$	PbMoO_4	[16]
11	$\text{PbO}+\text{WO}_3$	PbWO_4	[16]
12	$\text{Li}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{LiFeO}_2, \text{LiFe}_3\text{O}_8$	[17], [14]
13	$\text{Li}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	$\text{Li}(\text{Fe, Ti})_x\text{O}_y$	[18]
14	$\text{BaO}+\text{TiO}_2$	BaTiO_3	[19]
15	$\text{K}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	2KFeO_2	[12], [20]
16	$\text{K}_2\text{CO}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$	2KAlO_2	[12], [20]
17	$\text{ZnO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$	ZnFe_2O_4	[21]
18	$\text{NiO}+\text{Al}_2\text{O}_3$	NiAl_2O_4	[21]
19	$\text{ZnO}+\text{Al}_2\text{O}_4$	ZnAl_2O_4	[22]
20	$\text{NiFe}_2\text{O}_4+\text{ZnFe}_2\text{O}_4$	$(\text{Zn, Ni})\text{Fe}_2\text{O}_4$	[22]

Выборочно останавливаясь на имеющихся экспериментальных результатах, можно отметить, что, например, температура синтеза $BaTiO_3$ снижается при использовании мощного электронного облучения на 350-400°C.

Синтез гексаферритов стронция и бария осуществляется за время в сотни раз меньше, чем по существующей технологии (Рис.3). Причем, последовательность и механизм фазовых превращений не изменяется. Интенсивность синтеза объясняется снятием диффузионных сопротивлений и переводом процесса в кинетический режим [15]. Так в радиационно-термическом процессе монофазный гексаферрит бария получается уже через 15 минут отжига реакционной смеси при 1473°K. По существующей керамической технологии при той же температуре синтез длится 100-150 часов. При термических отжигах достичь полной глубины взаимодействия невозможно без частых промежуточных помолов реагирующей

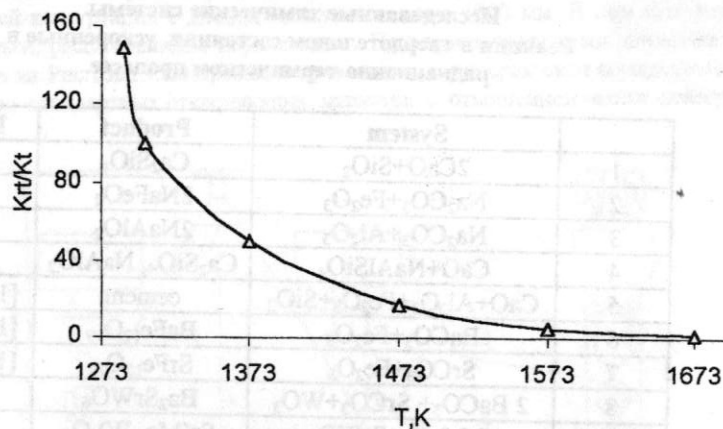


Рис.1 Температурная зависимость констант образования дисиликата кальция

смеси. В работе [16] сообщается, что радиационное облучение позволяет получать конечный продукт типа ABO_4 ($A=Pb, V=Mo, W$) в 1 стадию. При обычном синтезе необходимо 3-4 стадии термообработки, сопровождающихся измельчением реакционной смеси.

Можно добавить, что высокая скорость взаимодействия может значительно оптимизировать технологический процесс синтеза соединений, исходные компоненты которых имеют высокую летучесть. Принципиальная возможность этого была показана в экспериментах по синтезу соединений состава ABO_4 ($A=Pb, Sr, V=Mo, W$) и твердых растворов на их основе [15, 16]. Процесс синтеза монофазного продукта при облучении ускоренными электронами завершается за 3-5 минут, включая время выхода на заданную температуру 1200-1400°K. В этих условиях практически не происходит изменение стехиометрии исходной смеси, что даёт возможность получать продукт нужного состава.

Спекание шихты Li-Ti ферритов [18] так же протекает при облучении в 2 раза быстрее. Кроме того, действие электронного пучка резко ускоряет растворение паразитных включений и повышает фазовую гомогенность изделий [24].

Влияние пучка ускоренных электронов отмечается и в процессах взаимодействия типа твердое тело + газ [25]. Восстановление оксидов

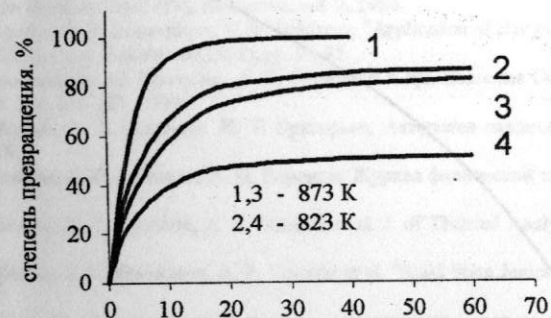


Рис.2 Кинетика синтеза молибдата свинца в радиационно-термических(1,2) и термических условиях(3,4)

Fe_2O_3, NiO, WO_3 водородом при облучении в температурном интервале 400-650°С происходит интенсивнее в 2, 1,5 и 4 раза соответственно. Этот эффект связан с активацией твердого вещества излучением. Процесс имеет большое технологическое значение как перспективный способ получения порошков металлов высокой степени чистоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют надеяться на возможность интенсификации и в других химических системах. Это открывает широкие перспективы перед радиационно-термическим синтезом как новой технологией в неорганическом материаловедении.

Основные преимущества использования мощных электронных пучков:

1. Значительная интенсификация твердофазного высокотемпературного взаимодействия в неорганических химических системах.
2. Получение веществ высокой степени чистоты, так как есть возможность устранения контакта с материалом тигля и футеровкой печного оборудования - "химическая чистота" электронного пучка.
3. Возможность получения температурного режима любого уровня сложности за счет оперативности в управлении электронным пучком.
4. Объемный ввод энергии в материал, позволяющий достигать высоких скоростей нагревания (до 200°K/с).

5. Возможность достижения высоких температур порядка 2000-2500°K.
6. Высокая точность поддержания температуры при изотермических отжигах (отклонение не более 0.5 %).

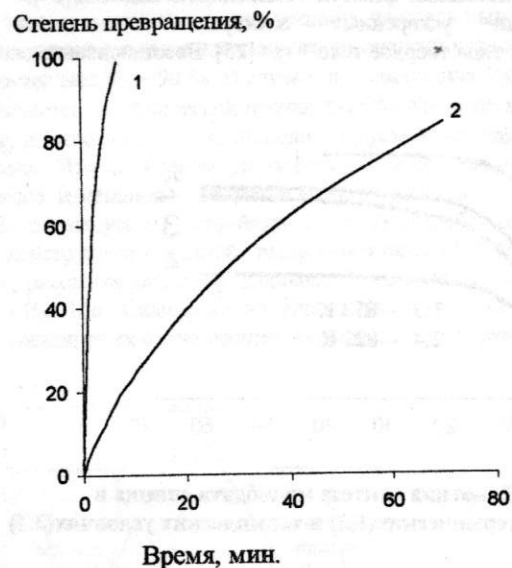


Рис.3 Кинетика синтеза гексафторита бария в радиационно-термических (1) и термических (2) условиях при температуре 1473°K

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Воронин, В.А. Неронов, Т. Ф. Мелехова и др. Доклады АН СССР, т. 258, с. 1393-1396, 1981.
2. V. A. Neronov, A. P. Voronin, V. L. Auslender et al. J. Less - Common Metals, 117, pp. 391-394, 1986.
3. Е. В. Ткаченко, Н. Л. Аксельдод, А. П. Воронин и др. Доклады АН СССР, т. 284, с. 413-415, 1985.
4. V. L. Auslender, R. A. Salimov, Atomic Energy, 44, pp. 403-408, 1978.
5. В. С. Вавилов, А. К. Кив, О. Р. Ниязова. "Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках", М., с. 365, 1981.
6. Дж. Динс, А. Дамаск, "Точечные дефекты в металлах", М., с. 291, 1966.
7. Л. Н. Заботина, Н. М. Усатова, Г. Д. Урываева, Известия СО АН СССР, Сер. хим. наук, 5, № 12, с. 172-175, 1979.
8. А. Ф. Вайсман, А. П. Воронин, О. С. Грибков и др., "Измерение температур в мощных пучках ускоренных электронов", Препринт ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1985.
9. А. П. Воронин, Н. З. Ляхов, А. Ф. Вайсман, Г. Б. Егоров, "РТ - силикатообразования в системе СаО-SiO₂", тезисы докладов "XII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии", Баку, 1981.
10. Б. К. Канимов, А. П. Воронин, В. Л. Ауслендер, "РТ - синтез щелочных минералов", Тезисы III конференции по радиационным гетерогенным процессам, Кемерово, с. 283, 1982.

11. М. Г. Абрамсон, Б. В. Волконский, С. К. Данюшевский и др., ДАН СССР, т. 230, с. 1395-1397, 1976.
12. Г. Б. Егоров, А. П. Воронин, В. Л. Ауслендер и др., Цемент, №1, с. 14-16, 1982.
13. М. Н. Шинко, Л. М. Летюк, А. П. Воронин и др., ДАН СССР, т. 296, № 4, с. 930-933, 1987.
14. Е. В. Ткаченко, А. П. Воронин, О. С. Грибков и др., ДАН СССР, т. 284, № 2, с. 413-415, 1985.
15. V. V. Boldyrev, A. P. Voronin, O. S. Gribkov et al. "Reviews of Solid State Science", vol. 3, № 2, pp. 193-202, 1989.
16. O. A. Polyanskaya, O. S. Gribkov, "Influence of ionizing radiation and light on heterogeneous systems" in Doklady Conf. (IV), Kemerovo, vol. 2, 1986.
17. G. R. Karagedov, E. A. Konovalova, V. V. Boldyrev, "Application of charge particles accelerator" in Proc. VI USSR Conf., Leningrad (1988), pp. 94-95.
18. В. А. Кожемякин, А. М. Притулов, А. П. Суржиков и др., Известия СО АН СССР, Сер. хим. наук, вып. 5, с. 116-120, 1990.
19. А. Ф. Вайсман, А. П. Воронин, Н. Т. Григорьев, Авторское свидетельство № 1074058 от 15.10.1983.
20. М. Г. Абрамсон, А. Ф. Вайсман, А. П. Воронин, Журнал физической химии № 8, с. 150-155, 1984.
21. J. G. Bochkarev, N. Z. Lyakhov, A. P. Voronin et al. J. of Thermal Analysis, vol. 43, pp. 21-31, 1995.
22. V. L. Auslender, J. G. Bochkarev, A. P. Voronin et al. "Solid State Ionics", № 101-103, pp. 489-493, 1997.
23. И. Г. Бочкарев, А. П. Воронин, В. В. Болдырев, ДАН СССР, т. 303, № 1, с. 122-125, 1988.
24. А. М. Притулов, А. П. Суржиков, В. А. Кожемякин, Phys. St. Sol. (a), vol. 119, pp. 147-152, 1990.
25. С. В. Русаков, В. Л. Ауслендер, И. Г. Бочкарев и др., Известия СО АН СССР, Серия химических наук, вып. 1, с. 36-41, 1987.

13. Л. А. Семенова, А. М. Гончар, Л. А. Богданова. Морфологические особенности периода очищения гнойных ран препаратами иммобилизованных бактериальных протеаз в эксперименте. - Бюлл. СО АМН, 1988, №5, стр. 109-114.
14. A. M. Gonchar, V. L. Auslender. Immobilization of Bacterial Proteases on Water-Soluble Polymer by Means of Electron Beam. // Radiat. Phys. Chem. 1996, V. 48, N 6, pp. 795-797.
15. А. М. Гончар, Б. С. Семенов. Перспективы применения препаратов иммобилизованных бактериальных протеаз. - Ветеринария, 1998, №7, стр. 57-59.
16. А. М. Гончар, Л. А. Богданова, З. Г. Шелогина. Препараты иммобилизованных протеаз при гнойных процессах. - Ветеринария, 1989, №4, стр. 52-55.
17. З. Г. Шелогина, А. М. Гончар, В. С. Авдеенко. Иммобилизованные протеолитические ферменты при послеродовых гнойно-катаральных эндометритов коров. // Ветеринария, 1989, № 6, стр. 41-42.
18. В. М. Карташова, О. Г. Богатов, А. М. Гончар, Р. И. Салганик. Способ лечения мастита сельскохозяйственных животных. Авторское свид. 1545349, СССР, 1990.
19. C. N. Dobbins. Mastitis losses // JAVMA, 1977, v. 170, N 10(2), pp. 1129-1132/
20. Р. И. Салганик, А. М. Гончар, Б. С. Семенов, В. С. Пономарев. Способ профилактики вирусных респираторных заболеваний животных. Роспатент № 2007185, 1994.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ ОДНОРАЗОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ДЛЯ ДРУГИХ МЕДИЦИНСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

В. Л. Ауслендер, А. А. Брызгин, М. В. Коробейников,
С. А. Максимов, В. И. Сербин, Л. А. Воронин, В. О. Ткаченко.
(Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук, Новосибирск)

А. М. Гончар
(Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии
наук, Новосибирск)

АННОТАЦИЯ

В последние годы большинство развитых стран используют электронно-лучевую обработку для стерилизации медицинских изделий как наиболее безопасный и экологически чистый из всех известных методов. Статья детально описывает автоматизированную установку для стерилизации одноразовых шприцев, работающую в России в городе Ижевске. Шприцы облучаются с двух сторон внутри упаковок, содержащих 250 шприцев каждая. Упаковки автоматически переворачиваются на наклонной части конвейера под действием собственного веса. Шприцы располагаются вертикально вдоль оси падения пучка электронов. Отношение максимальной поглощенной дозы к минимальной внутри шприцев составляет 1,4. Производительность установки составляет не менее 100 000 шприцев в час. Установка сделана на основе импульсного линейного ускорителя электронов ИЛУ-6, который представляет собой однорезонаторную машину с энергией электронов до 2,6 МэВ и средней мощностью в пучке до 20 кВт. Импульсный характер пучка и автоматическая система управления позволяют варьировать поглощенную дозу в широких пределах. Энергия электронов, ток пучка, частота повторения, положение пучка в выпускном окне и транспортировка обрабатываемых изделий управляются компьютером.

Также описаны электронно-лучевые технологии для иммобилизации ферментов, производства медицинских препаратов и гелей для медицинских и технических применений.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных технологических проблем стерилизации шприцев электронным пучком является достижение максимально возможной однородности распределения поглощенной дозы. Высокая неравномерность дозы приводит к

низкому качеству стерилизации, так как нижний предел дозы 25 кГр определяется стойкостью бактерий к облучению, а более высокая доза приводит к существенному ухудшению механических параметров шприца. Традиционно проблема равномерности распределения дозы внутри шприца решалась выбором энергии электронов около 10 МэВ и/или использованием конверторов для генерации гамма-излучения и соответственно облучением шприцев тормозным излучением.

Ускоритель электронов ИЛУ-6 это собой импульсный линейный высоко-частотный ускоритель с максимальной энергией электронов 2,6 МэВ [1]. Электроны с такой энергией обладают низкой проникающей способностью и поэтому до сих пор не использовались для стерилизации медицинских изделий так как в традиционной схеме облучения (перпендикулярно к оси шприцев) распределение дозы получается очень неравномерным.

Большая неравномерность дозы недопустима для стерилизации шприцев, так как максимальная поглощённая доза ограничена механическими требованиями (ухудшением механических параметров шприца). А в случае облучения электронным пучком с энергией 2-3 МэВ перпендикулярно оси шприца в некоторых зонах поглощённая доза может быть слишком низкой для достижения требуемого уровня стерилизации. Поэтому первой нетривиальной задачей, которую необходимо было решить, был правильный выбор позиции шприцев во время облучения чтобы получить минимальную неравномерность распределения дозы.

Наши эксперименты показали, что наиболее равномерное распределение поглощённой дозы достигается когда шприцы, упакованные в потребительскую упаковку (250 шприцев (объёмом 2 мл или 5 мл) вместе с иглами в картонной коробке размерами 420*21*120 мм), ориентированы во время электронно-лучевой обработки вертикально (или более корректно, параллельно оси падения пучка). Контрольная обработка шприцев проводилась в этом положении с энергией электронов 2,48 МэВ. Полученное значение коэффициента неравномерности дозы $C = D_{max}/D_{min}$ по всему объёму потребительской упаковки со шприцами было равно примерно 1,53 при значении минимальной дозы как минимум в 1,05 раз превышающем стерилизационную дозу (в большинстве стран стерилизационная доза принята равной 20 кГр). Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что эта схема облучения обеспечивает практически равномерное облучение в средней плоскости по всей глубине.

Гистограмма распределения дозы внутри шприцев приведена на рисунке 1. Измерение производилось при помощи микробного теста. Видно, что использованный рабочий режим даёт эффективную поглощённую дозу около 25 кГр. Это и послужило основой для формулирования технологического регламента для стерилизации электронным пучком - облучение должно производиться с двух сторон в потребительской упаковке и шприцы должны быть ориентированы вдоль направления электронного пучка.

Обычного дозиметрического контроля, основанного на измерении эффективной поглощённой дозы и распределения поглощённой дозы в обрабатываемых изделиях, недостаточно для оценки надёжности стерилизации шприцев. Должно быть произведено биологическое тестирование чтобы доказать надёжность стерилизации. Режим надёжной стерилизации должен быть проверен

биологическими методами, т. е., исследованием инактивации микробов после электронно-лучевой обработки.

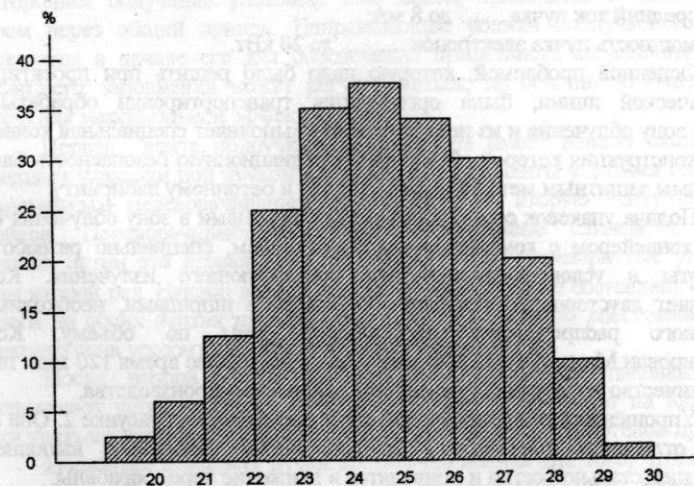


Рис. 1. Гистограмма распределения дозы внутри шприцев.

Биологическое исследование производилось с использованием культур специальных радиационно-устойчивых наборов штаммов микробов (с устойчивостью к ионизирующему излучению примерно 28 кГр). Уровень инактивации этих микробных культур в зависимости от поглощённой дозы очень хорошо изучен, поэтому они работают как своего рода биологический дозиметр. Биологические тесты показали, что двухстороннее облучение шприцев в потребительской упаковке гарантирует соблюдение общеприимного стандартного уровня безопасности 10^{-6} с запасом.

ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ.

Технологический регламент процесса электронно-лучевой стерилизации шприцев с иглами был утверждён Министерством Здравоохранения Российской Федерации. Этот регламент предусматривает возможность стерилизации электронным пучком, генерируемым ускорителем электронов ИЛУ-6, с энергией электронов 2,6 МэВ, стерилизация должна производиться с двух сторон (двухстороннее облучение) с неравномерностью примерно 50%.

В институте ядерной физики им. Будкера был разработан и изготовлен автоматизированный комплекс на основе импульсного линейного ускорителя ИЛУ-6 [1, 2 & 3] для стерилизации одноразовых медицинских шприцев. Комплекс установлен на предприятии "ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД", г. Ижевск.

Параметры ускорителя ИЛУ-6 приведены ниже:

энергия электронов до 2.6 MeV;
 частота повторения импульсов до 50 Hz;
 средний ток пучка до 8 mA;
 мощность пучка электронов до 20 кВт.

Основной проблемой, которую надо было решить при проектировании технологической линии, была организация транспортировки обрабатываемых изделий в зону облучения и из неё. Эту работу выполняет специальная конвейерная система, конструкция которой обеспечивает радиационную безопасность благодаря специальным защитным металлическим листам и бетонному лабиринту.

Подача упаковок со стерилизуемыми шприцами в зону облучения осуществляется конвейером с компьютерным управлением, специально разработанным для работы в условиях воздействия ионизирующего излучения. Конвейер обеспечивает двустороннее облучение упаковок со шприцами, необходимое для равномерного распределения поглощённой дозы по объёму. Комплекс сертифицирован Минздравом РФ и выпускает в настоящее время 120 млн. шприцов в год. Количество продукции определяется мощностью производства.

Упрощённый вид конвейерной системы показан на рисунке 2. Она состоит из трёх отдельных конвейеров. Несущие ленты конвейеров выполнены из нержавеющей стальной сетки и приводятся в движение через барабаны.

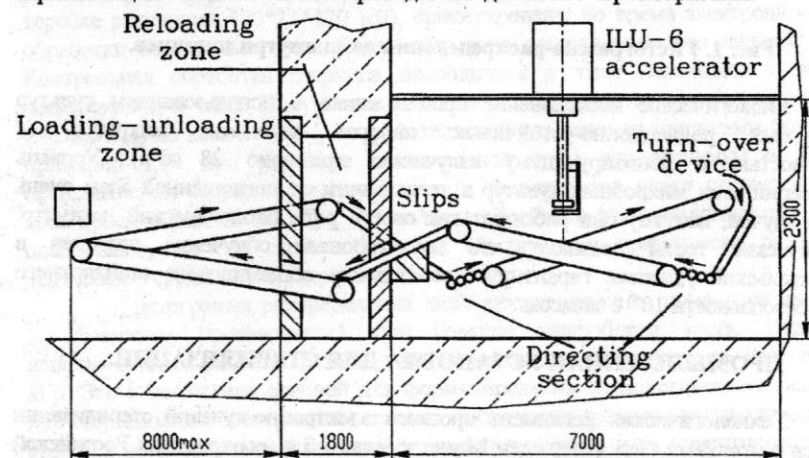


Рис. 2. Упрощённый вид конвейерной системы вместе с ускорителем.

Первый подающий конвейер перемещает упаковки со шприцами из склада необработанной продукции в зону облучения через отверстие в биологической защите. Наклон этого конвейера около 15 градусов. Металлический барабан этого конвейера обеспечивает дополнительную радиационную защиту. После первого

конвейера упаковки соскальзывают по металлическому слипу и попадают на направляющие ролики второго, подпучкового, конвейера.

Второй конвейер (подпучковый) имеет две ленты, изготовленные из стальной нержавеющей сетки. Он транспортирует упаковки под пучком, переворачивает их и снова транспортирует под пучком, обеспечивая таким образом двухстороннее облучение упаковок. Обе ленты приводятся в движение одним мотором через общий привод. Направляющие ролики подпучкового конвейера расположены в начале его для обеспечения правильного заполнения конвейера. Коэффициент заполнения может регулироваться, но обычно он близок к 1 для обеспечения максимальной эффективности.

Первая лента подпучкового конвейера имеет наклон около 10°. Она перемещает упаковки под пучком один раз. В конце ленты упаковки падают вниз с одновременным переворачиванием и попадают на вторую ленту подпучкового конвейера. Переворачивающее устройство снабжено слипом с воздушной подушкой. Затем эта вторая лента перемещает уже перевёрнутые упаковки под пучком второй раз. Наклон второй ленты конвейера также составляет около 10°, и упаковки на обеих лентах проходят под пучком на равном расстоянии от фольги выпускного окна ускорителя. Это расстояние регулируется.

После второй ленты подпучкового конвейера упаковки по слипу соскальзывают через выходное отверстие защиты и попадают на направляющие ролики третьего конвейера, который перемещает их на склад готовой продукции.

Поскольку мощность пучка достаточно велика для того, чтобы повредить конвейер, в центральной части подпучкового конвейера размещён водоохлаждаемый коллектор пучка. Также имеется отдельный водоохлаждаемый коллектор пучка, используемый для защиты конвейера во время регулировки и настройки установки.

Установка полностью автоматизирована. Компьютерная система (на основе IBM PC простейшей модели) управляет энергией, током пучка, частотой следования импульсов, а также системой транспортировки облучаемых изделий. Оператору для настройки нужно ввести только значение минимальной поглощённой дозы. Далее управляющая программа устанавливает и затем поддерживает необходимый режим облучения, стабилизируя все необходимые параметры с точностью до 1%, производит непрерывную диагностику оборудования, выдаёт сообщения о сбоях и недопустимых отклонениях рабочих параметров, а также ведёт "автоматический журнал" в памяти компьютера, в котором регистрируются режимы для каждой упаковки. Такая система была реализована впервые для промышленной стерилизационной установки.

Управляющая программа обрабатывает и критические ситуации - в случае неполадок в конвейерной системе она отключает ускоритель, и если возникает проблема с ускорителем (например, отключение электроэнергии, перебои в подаче охлаждающей воды или воздуха), то конвейер останавливается. Максимальное количество дефектных изделий в этих случаях ограничивается одной упаковкой.

Изготовленная технологическая линия позволяет стерилизовать 90 000 одноразовых шприцев с иглками в час. Стерилизация производится в потребительских упаковках. Производительность установки при одной рабочей смене в день составляет более чем 150 миллионов изделий в год.

Такая же технология облучения используется в другой установке на основе ускорителя ИЛУ-6, работающей в Киеве. Ускоритель ИЛУ-10, имеющий диапазон энергии до 4 МэВ, предназначается для следующих установок. Он позволит расширить круг облучаемых изделий, так как проникающая способность электронного пучка растёт с ростом энергии электронов.

Был также спроектирован другой вариант облучательной установки с использованием кольцевого конвейера. Его конструкция показана на рисунке 3.

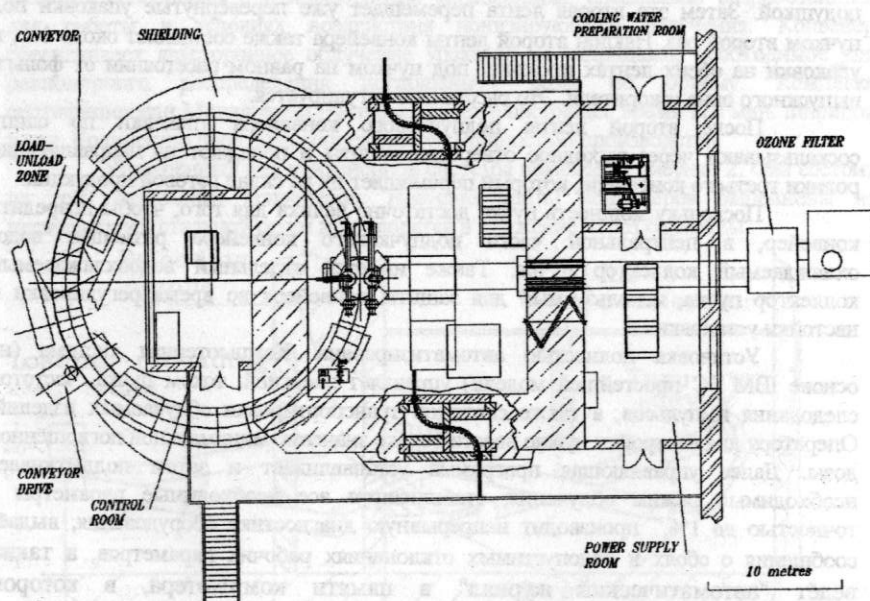


Рис. 3. Облучательная установка с кольцевым конвейером.

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Большой областью применения электронного пучка является низкотемпературный химический синтез, идущий благодаря свободно-радикальной сшивке. Например, водный раствор полиэтиленоксида (ПЭО) после облучения становится гелем, а поглощённая доза определяет консистенцию геля. Гели ПЭО

широко используются как носители в медицине, косметических продуктах, производстве зубных паст, контактных сред для ультразвуковой диагностики, и т. д.

Свободно-радикальная сшивка может быть использована для сшивания больших молекул с другими молекулами для придания им качественно новых свойств. Одним из возможных вариантов является так называемая иммобилизация ферментов на различных носителях - полимерах, обладающих некоторой пространственной структурой [4]. Мы приобрели опыт в использовании ускорителей типа ИЛУ для радиационной иммобилизации различных биологически активных субстанций на полимерных матрицах, а также в радиационной сшивке низкомолекулярных полиэтиленоксидов в водных растворах на стадии образования геля.

Препараты иммобилизованных ферментов на основе полимерных носителей используются в аналитической химии, биотехнологии, медицине и в охране окружающей среды. Они могут быть произведены известным методом радиационной иммобилизации при помощи различных источников ионизирующего излучения [4, 5 & 6]. Специфическая активность иммобилизованных ферментов зависит от начальной активности фермента и режима иммобилизации. Наша технология иммобилизации позволяет сохранить от 40 до 60% начальной активности фермента. Использование радиационной технологии для иммобилизации ферментов на полимерной матрице позволяет производить различные медицинские и ветеринарные препараты и компоненты, различные чистящие средства, активные компоненты для составов, используемых для мытья шерсти и для процессов мягчения и обезволаживания шкур крупного и мелкого рогатого скота и свиных шкур.

Комплекс бактериальных протеаз в водном растворе полимера в процессе облучения образует свободно-радикальные связи, формирующие мицеллярные структуры фермент-полимер. Радиационная иммобилизация протеолитических ферментов на полимерной матрице придаёт им качественно новые свойства - время специфического действия ферментов увеличивается в десятки раз с сохранением их специфических свойств. Полученный ферментный комплекс сохраняет свой высокий уровень специфической активности в широком диапазоне рН (6-11,5) и температуры (18-80°C).

Использование иммобилизованных ферментов позволяет удалить волосы со шкуры и получить неповреждённую и чистую шерсть с повышением экологической безопасности благодаря сокращению потребления воды и химических препаратов. Продолжительность процесса обезволаживания составляет для овечьих шкур 1-3 часа, для шкур крупного рогатого скота 6-8 часов. Выход сухой чистой шерсти составляет 320-360 грамм с одной овечьей шкуры и 1000-1500 грамм с одной шкуры крупного рогатого скота. Ферментативное замачивание позволяет организовать производственный цикл без смягчения шкур.

Компоненты моющего раствора «Бисиб» формируют двухфазную жидкую систему, содержащую иммобилизованные ферменты. Её основные компоненты более безопасны после использования, чем широко применяемые сульфаты, фосфаты натрия и железа, полифосфаты и жидкое стекло. И использованный моющий раствор перемещается в разделительную колонку где он

быстро разделяется на три слоя. Верхний слой содержит большое количество ланолина, который может быть извлечён для использования в косметической промышленности. Средний слой (примерно 85% от всего объёма) - это чистый моющий раствор, готовый для дальнейшего использования. Нижний слой содержит частички грязи, удалённой с шерсти, которая может быть использована как хорошее удобрение.

МЕДИЦИНСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

В настоящее время электронные ускорители применяются в основном для стерилизации шприцев и значительно реже для стерилизации лекарственных форм. Это связано с недостаточной научной проработкой проблемы и слабой информированностью медицинской общественности о возможностях метода.

На ускорителях ИЛУ-6 и ИЛУ-10 проводились исследования и отрабатывались технологии стерилизации медицинского инструментария (шприцы, системы переливания крови, повный материал, одноразовые гинекологические наконечники и т.п.) совместно с различными организациями Новосибирска, Красноярска, Барнаула и других городов. Другая примыкающая проблема, также прорабатывавшаяся на нашем стенде - возможность изготовления стерильной хирургической одежды и медицинского белья из специальных тканых и нетканых материалов.

Совместно с центром "МЕДИЦИНА КАТАСТРОФ" отрабатывается возможность создания запаса стерильного медицинского инструмента на случай чрезвычайных ситуаций.

Серьёзной проблемой является стерилизация лекарств и препаратов, расфасованных в стандартные флаконы Ф0-10, в обиходе обычно называемые «пенициллиновыми». Прямолинейным (или можно сказать лобовым) решением проблемы является гамма-стерилизация препаратов, расфасованных во флаконы, или стерилизация электронным пучком с энергией 5-10 МэВ. Недостатков обоих методов можно избежать при использовании следующего метода стерилизации, предложенного В.Л. Ауслендером и В.А. Поляковым. Специальный транспортёр перемещает флаконы под пучком, вращая их, при этом происходит перемешивание содержимого флакона. При правильно выбранных параметрах пучка и скорости перемещения все частицы содержимого флаконов получают необходимую дозу при энергии электронов 2,5-4,0 МэВ.

В Институте Туберкулёза г. Новосибирска разработана оригинальная методика лечения больных препаратом «ПАСК» (парааминосалициловая кислота). «ПАСК» является очень эффективным и достаточно дешёвым препаратом для лечения туберкулёза, однако технология его производства не позволяет получить препарат с достаточной стерильностью. При термической стерилизации «ПАСК» разрушается.

Обычный способ лечения препаратом «ПАСК» - приём порошка или таблеток внутрь. В Институте Туберкулёза был предложен метод внутривенного введения препарата, что, однако, требует его стопроцентной стерильности. На ускорителе ИЛУ-6 были отработаны методы электронно-лучевой стерилизации

препарата без нарушения его лечебных свойств. Клинические испытания стерилизованного таким образом препарата, проведённые в Институте Туберкулёза, показали, что эффективность лечения по этому методу значительно возрастает, а стоимость лечения уменьшается в 2-3 раза. В настоящее время совместно с Новокузнецким Химическим Комбинатом отрабатывается схема промышленного производства высоко стерильной парааминосалициловой кислоты.

В Институте Неорганической Химии СО РАН и в Институте Катализа СО РАН разработаны сорбенты, превосходящие в несколько раз древесный уголь по своей эффективности. Эти сорбенты в комплексе с антибиотиками, стерилизованные методом ЭЛС, в настоящее время проходят клинические испытания при лечении послеродовых и послеоперационных травм на кафедре гинекологии Новосибирского Медицинского Института и в некоторых клиниках Новосибирска.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к стерильности упаковок и посуды для медицинских нужд. Мы наладили сотрудничество с Институтом Трансплантации Почек г. Барнаула и провели работы по стерилизации упаковочных средств для длительного хранения материалов, необходимых для пересадки почек.

В последнее время вырос интерес к препаратам и лекарствам из натуральных компонентов. Для производства таблетированных лекарств из экологически чистых трав и корней, произрастающих в Горном Алтае, в г. Бийске на основе программы конверсии было организовано АО «Бальзам». Так как изначальная обсеменённость исходного сырья патогенной флорой достаточно высока, мы совместно с АО «Бальзам» провели серию экспериментов по стерилизации образцов препаратов. Контрольный микробиологический анализ, проведённый после обработки, подтвердил полную стерильность таблеток, а физико-химические исследования подтвердили полное сохранение лечебных свойств таблеток. В настоящее время налаживается процесс промышленного производства этих таблеток со стерилизацией их на ускорителе ИЛУ-6.

Методика стерилизации, отработанная на ускорителе ИЛУ-6, позволяет производить лекарственные препараты с высокой степенью микробиологической чистоты на основе сырья животного происхождения, например, панкреатин, пепсин, холенин, тиреодин. Эти работы проводились совместно с заводом медпрепаратов г. Новосибирска. Все методики, разработанные на ускорителе ИЛУ-6, используются и на ускорителе ИЛУ-10.

Метод ЭЛС может быть использован и для стерилизации мелко-дисперсных сухих сред. Так, в ГНЦ Вирусологии и Биотехнологии РФ "ВЕКТОР" разработаны сухие питательные среды для однослойного и суспензионного культивирования клеточных культур. В сухой форме питательные среды выпускаются в виде порошков, расфасованных во флаконы Ф0-10, которые стерилизуются на ускорителе ИЛУ-6 по предложенному нами методу. Сухие питательные среды, стерилизованные таким способом, прошли аттестацию в ГИСК им. Тарасевича Минмедпромпздрава РФ.

Утверждены следующие фармстатьи:

•ФС 42-351 ВС-90 среда "ИГЛИА" стерильная сухая.

- ФС 42-347 ВС-90 среда "199М" стерильная сухая.
- ФС 42-346 ВС-90 среда "МЕМ4" стерильная сухая.
- ФС 42-350 ВС-90 среда "RPVI-1640" стерильная сухая.

Перспективным представляется процесс производства и стерилизации пластмассовой посуды малого объёма для разлива лечебно-профилактических препаратов в соответствии с новыми требованиями Минздрава РФ. Эта работа проводится нами в сотрудничестве с АО «БИО-ВЕСТА», производящим лечебно-профилактический препарат «Бифиллин-М».

Одной из наиболее интересных перспектив применения ускорителей ИЛУ-6 и ИЛУ-10 является возможность их использования для производстве медицинских изделий из резины (детские соски, всевозможные прокладки, презервативы и т.п.). Исследования, проведенные в нашей лаборатории, показали, что практически все типы каучуков (за исключением бутил-каучука) очень хорошо спиваются (вулканизируются) под воздействием электронного пучка без применения дополнительных химических реагентов. Учитывая резко возросшие требования к экологической чистоте производства и биологической безопасности медицинских изделий, применение ускорителей в этих производствах имеет неоспоримые преимущества. Если использование ускорителей типа ИЛУ для производства объемных изделий (автошины, шахтные кабели и т.д.) представляется в настоящее время проблематичным, во всяком случае требующим больших дополнительных исследований, то применение их для производства тонколистовой резины для медицинских целей может дать заметный экономический эффект.

Проводились работы по покрытию тонким слоем полимера внутренних стенок кварцевых капиллярных колонок для медико-биологической и химической хроматографии. Покрытие осуществлялось путём облучения капилляров, заполненных мономером. Образовавшееся защитное покрытие существенно увеличивает срок службы и чувствительность колонок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Auslender V. L. The EB Treatment - Current and Future Applications. In "Isotopes and Radiation Technology in Industry" (Eds. S. M. Rao, K. M. Kulkarni), Perfect Prints, India, 1994. Pp. 123-136.
2. Auslender V. L., Polyakov V. A., Golnik A. G. et al. The installation for the single-use medical devices sterilization based on the electron accelerator type ILU. Radiat. Phys. Chem. Vol.42, Nos 1-3, pp.563-566, 1993.
3. Auslender V. L. ILU-type electron accelerators for industrial technologies. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 89 (1994) 46-48.
4. A. M. Gonchar and V. L. Auslender. Immobilization of Bacterial Proteases on Water-Solved Polymer by Means of Electron Beam. Radiat. Phys. Chem. Vol.48, No 6, pp.795-797, 1996.
5. Schachinger L., Schippel Ch., Altmann E., Diepold B., Yang Ch., Jaenike, Hochhaeuser E. (1985). Effect of irradiation on immobilized enzymes compared with that on enzymes in solution. Radiat. Environ. Biophys., V. 24, 259.
6. Kaetsu I., Kumakura M., Fujimura T., Yoshida M., Asano M., Kasai N., Tamada M. (1986). Studies on the immobilization of biofunctional components by radiation polymerization and their applications. Radiat. Phys. Chem. V.27, 245.

Вестник "Радтех - Евразия"

№ 1 (9)

Сдано в набор 7.07.1999 г.

Подписано в печать 7.07.1999 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 10.6 печ.л., 8.5 уч.-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 57

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.