

Медицинский линейный ускоритель электронов ЛУЭР-20М, опыт наладки и применения

В.П. Малышев, Ю.В. Мясников, В.М. Николаев, И.А. Прудников, С.П. Смирнов
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

В начале 90-х годов на основе опыта эксплуатации ранее выпускаемых НИИЭФА ускорителей ЛУЭВ-15М и взамен им, рекомендаций врачей-радиологов, а также с учетом требований МЭК была разработана и изготовлена серия медицинских линейных ускорителей электронов ЛУЭР-20М с энергией квантов тормозного излучения 6 и 18 МэВ и энергией электронов 5; 8; 11; 14; 17 и 20 МэВ.

Ускоритель позволяет в условиях специализированных клиник проводить полные курсы лучевой терапии в статическом и ротационном режимах с ручным и автоматизированным управлением, а также может быть использован и для медико-биологических исследований.

В состав оборудования ускорителя входят:

1. Шкаф излучателя.
2. Шкаф СВЧ-генератора.
3. Шкаф модулятора клистрона.
4. Блок теплообменника.
5. Стойка управления.
6. Медицинский пульт управления.

В излучателе объединены в единую конструкцию системы и узлы ускорителя, обеспечивающие создание и формирование электронного пучка, его ускорение, создание равномерных полей облучения пациента, измерение и контроль различных параметров. Излучатель состоит из неподвижного шкафа, расположенного на опорной раме, и вращающейся консоли.

В неподвижной части смонтированы: механизм поворота консоли, системы питания поворотного магнита, фокусирующей и корректирующих катушек, ряд блоков управления, вращающееся волновое соединение.

Во вращающейся консоли смонтированы: ускоряющее устройство с фокусирующей и корректирующей катушками, источник электронов, поворотно-формирующее устройство, радиационная головка.

В ускорителе ЛУЭР-20М применено ускоряющее устройство (УУ), работающее на стоячей волне, что позволило довести напряженность электрического поля на оси ускоряющих резонаторов до 275 кВ/см и при длине УУ 1,7 м ускорять электроны до энергии более 20 МэВ.

Для сравнения, в ускорителе ЛУЭВ-15М1, работающем на бегущей волне, для получения электронного пучка с такой же энергией необходимо УУ с длиной 2,8 м при напряженности электрического поля 100 кВ/см.

Для обеспечения возможности глубокой регулировки энергии ускоренных электронов от 5 до 20 МэВ на выходе УУ использован специальный узел регулировки энергии (УРЭ), расположенный на расстоянии 60 см до конца структуры и позволяющий менять фазу волны, в которой движутся электроны, прошедшие УРЭ. Конструктивно УРЭ представляет собой ускоряющий резонатор, разделенный пополам диафрагмой с приосевым отверстием для прохода пучка, в объем которого с помощью электромеханических приводов можно вводить 4 радиально расположенных штока. В зависимости от положения штоков образованные таким образом два резонаторных объема могут работать на двух фиксированных типах колебаний "0" и "π".

В первом случае осуществляется режим ускорения электронного пучка по всей длине УУ и в зависимости от уровня подаваемой в ускоряющую структуру СВЧ-мощности возможно ускорение электронов до энергий 17; 18 и 20 МэВ.

Во втором случае ускорение электронов осуществляется на участке до УРЭ, и их торможение – после УРЭ. В этом режиме возможно получение электронов с энергией 5; 6; 8 МэВ.

При промежуточном положении штоков, которое приходится подбирать экспериментальным путем в процессе наладки ускорителя, возможен вариант распределения поля, когда СВЧ-мощность не проникает

за УРЭ, и ускорение электронов осуществляется только в передней части УУ до УРЭ. В таком режиме (в зависимости от уровня СВЧ-мощности) возможно получение электронов с энергиями 11 и 14 МэВ.

Принципиально имеется возможность по предварительному согласованию с Заказчиком настраивать ускоритель на любой ряд из 8 энергий в диапазоне 5–20 МэВ.

Конструктивно УУ помещено внутрь рамы в форме трубы и расположено под углом 40° к горизонтальной оси, проходящей через изоцентр. Такое расположение позволяет сократить длину излучателя и способствует повышению жесткости конструкции.

Проведенные в процессе наладки ускорителя измерения показали высокую стабильность положения изоцентра при вращении излучателя ($\pm 0,5$ мм), что позволяет использовать ускоритель ЛУЭР-20М (в комплекте с дополнительным оборудованием) для лучевой терапии узкими пучками фотонов (5–15 мм) тормозного излучения внутричерепных малообъемных новообразований, что является альтернативным (и более дешевым) методом лечения пучками протонов.

В таком режиме работает с 1997 года ускоритель ЛУЭР-20М в ЦНИРРИ пос. Песочный, Санкт-Петербург, где прошли полный курс лечения более 120 больных.

Особенности применения ускорителя для данного метода лечения посвящен отдельный доклад.

В качестве источника СВЧ-мощности в ускорителе используется усилительный клистрон КИУ-111, расположенный в шкафу ГСВЧ.

Клистрон имеет следующие параметры:

Рабочая частота, МГц	2450
Импульсная выходная мощность, МВт	5
Средняя выходная мощность, кВт	5
Длительность импульса, мкс	до 7

Особенностью клистрона является низкое анодное напряжение (до 55 кВ) и пакетированная конструкция – использование фокусирующей системы из постоянных магнитов, являющихся непосредственной составной частью клистрона. Для возбуждения клистрона используется возбудитель – задающий генератор, предназначенный для создания СВЧ-мощности на входе клистрона и управляющий его рабочей частотой.

При разработке ускорителя проектировалось применение возбудителя, обеспечивающего поддержание рабочей частоты клистрона с высокой точностью (до 10^{-5}).

Однако в процессе наладки и клинических испытаний ускорителя оказалось, что такая схема управления частотой клистрона является неоптимальной, так как требует обязательного прогрева УУ до рабочей температуры 40° и поддержания ее с точностью $\pm 0,5^\circ$ в процессе работы из-за того, что уход рабочей частоты УУ составляет 45 кГц/градус, и совпадение частоты клистрона с рабочей частотой УУ возможно в очень узком диапазоне температур. Поэтому была предложена, разработана, изготовлена и испытана оригинальная система автоматической подстройки частоты (АПЧ) клистрона под собственную частоту УУ.

Входным сигналом для системы АПЧ является огибающая импульса отраженной СВЧ-мощности, минимум которого зависит от совпадения частоты клистрона с рабочей частотой УУ при данной температуре. Система АПЧ управляет частотой возбудителя и соответственно частотой клистрона таким образом, чтобы минимизировать отраженную мощность. Такой вариант управления позволяет применять возбудитель с меньшей стабильностью частоты, значительно уменьшить время прогрева ускорителя, снизить требования к точности стабилизации температуры, а также снимать высокое напряжение с клистрона на период укладки пациента, что обеспечивает повышение безопасности применения ускорителя.

Управление ускорителем ЛУЭР-20М может осуществляться с помощью традиционной релейной системы УБС (ручное управление) и от компьютерной системы управления, которые в процессе работы могут дублировать друг друга. Такая особенность связана с тем, что на этапе разработки ускорителя еще не было достаточного опыта работы с компьютерными системами управления и, для обеспечения безопасности пациента была принята концепция двойной системы УБС. Опыт наладки и эксплуатации ускорителей показал, что на данном этапе такое решение было правильным и дало возможность проводить параллельно наладку систем ускорителя и отработку компьютерной системы управления.

В результате работы была создана компьютерная система управления, которая наряду с традиционным предназначением позволяет улучшить точность и надежность проведения лечебных процедур, а также вести регистрацию результатов по каждому сеансу облучения в течение всего периода лечения.

В ходе проведения наладочных работ была осуществлена модернизация системы ВЧ-питания. В частности, вместо ранее применяемого кварцевого вакуумного ВЧ-окна на входе в УУ стало использоваться керамическое окно "баночного" типа, обладающее существенно большей надежностью.

Опыт эксплуатации ускорителей в ЦНИРРИ пос. Песочный, г. Санкт-Петербург и в Областном онкологическом диспансере (ООД) г. Нижний Новгород показал целесообразность осуществления непрерывной вакуумной откачки ускоряющего устройства с источником электронов и камерой поворотного магнита. Поддержание высокого вакуума даже в неработающем ускорителе существенно повышает электрическую прочность ускоряющей структуры на стоячей волне, работающей при высоких напряжениях электрического поля. Кроме того, постоянное сохранение высокого вакуума в районе источника электронов способствует повышению стабильности характеристик электронного пучка, инжектируемого в ускоряющее устройство, что особенно заметно после замены катодного блока источника. Постоянная вакуумная откачка позволяет также сократить время ввода ускорителя в режим в начале рабочего дня.

По результатам проведения наладочных работ на ускорителях ЛУЭР-20М в НИИ онкологии им. проф. Н.Н. Петрова (г. Санкт-Петербург), РНЦРР (г. Москва), а также опыта клинической эксплуатации в ЦНИРРИ (г. Санкт-Петербург) и ООД (г. Нижний Новгород) ведется подготовка к проведению модернизации ускорителей с целью их дальнейшего производства на современном научно-техническом уровне.

