

## Настройка и испытание выходного устройства серии ускорителей ЛУЭР-20М

З.А. Андреева, А.В. Гальчук, Л.Е. Королев, М.Г. Нагаенко,

В.М. Николаев, Ю.А. Свистунов, Б.Н. Тронов

*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

Современные ускорители для лучевой терапии должны с высокой точностью воспроизводить форму полей облучения в статических и ротационных режимах облучения. Пучок на мишени, предназначенной для генерации тормозного излучения, должен иметь малый диаметр, а для обеспечения сканирования пучка в режиме электронного облучения желательна малая угловая расходимость.

Чтобы исключить влияние энергетического разброса частиц на качество пучка на мишени в ЛУЭР-20М применено ахроматическое поворотное-фокусирующее выходное устройство из трех дипольных электромагнитов с однородным по радиусу магнитным полем. В работе изложена методика наладки выходного устройства, включающая измерение и выравнивание поля в магнитах, расчет эффективных длин, механическую обработку полюсов и моделирование динамики электронов с целью исследования оптических характеристик поворотного-фокусирующей системы. Приводятся результаты наладки выходных устройств пяти различных образцов ЛУЭР-20М и экспериментальные данные при работе с пучком на ускорителе НИИ онкологии им. Н.Н.Петрова в Санкт-Петербурге.

Ускоритель ЛУЭР-20М является универсальной машиной с вариацией энергии ускоренных электронов от 5 до 20 МэВ и энергией тормозного излучения 6 и 18 МэВ. Пучок на мишени, предназначенной для генерации тормозного излучения, должен иметь диаметр не более 3 мм и обладать достаточно малой расходимостью, чтобы обеспечить сканирование электронного пучка в режиме электронного облучения.

Поворотное-фокусирующее устройство, помогающее сформировать требуемый пучок на мишени, должно иметь, по возможности, минимальные габариты, поскольку расстояние от мишени до изоцентра ротации и от изоцентра до пола жестко ограничено. Поворотное-фокусирующее устройство для ЛУЭР-20М представляет собой блок из трех магнитов. Первые два магнита с углами поворота  $75^\circ$  образуют систему параллельного переноса пучка. Третий магнит поворачивает пучок на  $130^\circ$  и направляет его на радиационную мишень. Радиус поворота электронов в магнитах 100 мм. Было разработано два варианта полюсных накладок для поворотного устройства [1]. В первом варианте накладки формировали градиентное по радиусу магнитное поле, во втором — однородное. В обоих вариантах применена краевая фокусировка электронов с искривлением эффективных границ. Первый вариант оказался очень чувствительным к неточностям изготовления и сборки и весьма сложен в наладке. Поэтому окончательный выбор был сделан в пользу второго варианта.

Схематическое изображение поворотного-фокусирующего устройства дано на рис. 1. Сильное перекрытие полей от соседних электромагнитов затрудняло оценку эффективных длин полей вдоль траектории частиц и, следовательно, настройку системы транспортировки. Поскольку питание магнитов осуществляется последовательно, то при сильно различающейся форме полюсных наконечников это приводит к трудностям при попытке выравнивания полей во всех магнитах. Измерение магнитного поля проводилось с использованием координатного устройства на основе линейки из четырнадцати датчиков Холла. Карта магнитного поля измерялась в прямоугольной системе координат с шагом 5 мм по обеим координатам (см. рис. 1). Магнитометрическая аппаратура на базе цифрового вольтметра Ш1518 с электронным коммутатором была выполнена в стандарте “Камак” с использованием персонального компьютера с 286-м процессором. Точность измерения магнитного поля в опорных точках была не хуже  $10^{-3}$ . Порядок наладки выходного устройства был следующим.

1. Снималась карта магнитного поля системы и проводилась численная оптимизация угловых протяженностей отдельных магнитов и поля в них путем моделирования динамики электронов с целью обеспечения требований, предъявляемых к качеству пучка на мишени. Изменение полей осуществлялось с помощью корректирующих обмоток, расположенных на первом и втором магнитах.

2. Если половинного поля корректирующих обмоток оказывалось недостаточно и не оставалось резерва для формирования пучка на мишени при настройке ускорителя в лабораторных условиях, то осуществлялась механическая обработка боковых поверхностей полюсов (подрезка).

3. Карты магнитного поля снимались снова для различных режимов ускорения электронов (по крайней мере для двух — 18 и 6 МэВ) и также снималась кривая намагничивания поворотной системы.

4. Проводился заключительный комплекс расчетных работ. Определялись параметры пучка на мишени с учетом вариационных характеристик системы и возможностей механической юстировки. При необходимости процесс мог быть повторен, однако каждый раз этих этапов оказывалось достаточно для наладки.

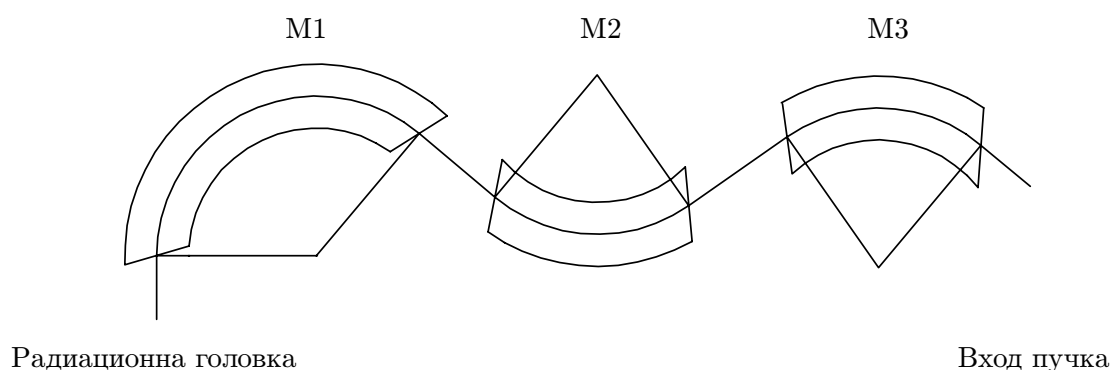


Рис. 1: Поворотное-фокусирующее устройство.

Конструкция поворотного магнита и радиационной головки выполнены таким образом, что эти устройства могут смещаться в направлениях, параллельных плоскости, проходящей через ось ускоряющего устройства, и параллельных друг другу.

Это позволяет скомпенсировать неточности, допущенные при изготовлении и монтаже оборудования, посредством смещения поворотного магнита относительно его вакуумной камеры и оси радиационной головки, а также производить юстировку радиационной головки относительно оси пучка, выходящего из камеры поворотного магнита. Это позволяет несколько снизить требования, предъявляемые к точности изготовления магнитной системы. Три экземпляра поворотного устройства были установлены на ускорителях ЛУЭР-20М, и с их помощью был осуществлен поворот пучка на  $135^\circ$  и вывод его на ось радиационной головки.

Измеренный на ускорителе в Институте онкологии им. Н.Н. Петрова диаметр пучка в плоскости мишени тормозного излучения оказался приблизительно равным диаметру на входе в магнит и составил около 3 мм (на полувысоте кривой распределения электронов по сечению пучка). При этом удалось провести через камеру поворотного магнита до 85 % частиц, исходя из значений импульсных токов на входе в поворотный магнит и на мишени тормозного излучения соответственно. Процент частиц, проходящих через поворотный магнит, снижался до 75 %, если измерялись средние токи. Это объясняется переходными процессами, происходящими на фронте и спаде высокочастотных импульсов, приводящих к расширению энергетического спектра, что вследствие ограниченного акцептанса магнитной системы приводило к потере частиц в камере поворотного магнита.

Результаты настройки поворотного выходного устройства этого ускорителя видны из рис. 2-5. На рис. 2 приведена траектория осевой частицы до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) настройки. В первом случае учтено поле основной обмотки. Во втором — поле основной обмотки и корректирующих катушек (коэффициент использования первой обмотки 17%, второй обмотки 20%). Рис. 3 показывает изменение характеристик осевой частицы при изменении относительного положения ускорителя и мишени. Рис. 4 и 5 иллюстрируют пропускную способность канала выходного устройства по отношению к изменениям энергии и фазовых характеристик пучка. На рис. 4 дана траектория осевой частицы в зависимости от начальной энергии (пунктирная линия — траектория с номинальной энергией). На рис. 5 — траектории частиц в зависимости от начальных смещения и углового отклонения при номинальной энергии. При расчетах диаметр пучка на выходе ускорителя принимался равным 5 мм при энергии 6 МэВ и 3 мм при энергии 18 МэВ, максимальные значения угловых расходимостей частиц были 4 и 2.4 мрад соответственно.

Таким образом, теоретически и экспериментально было показано, что выбранная поворотной-фокусирующая система обеспечивает требуемые параметры пучка на мишени при сравнительно мягких требованиях к точности изготовления и сборки магнитов.

## Список литературы

- [1] В.Д.Борисов, А.Н.Клинов, М.Г.Нагаенко, И.А.Прудников, Ю.П.Севергин, Ю.Ф.Чичикалов, Н.Ф.Шилкин, И.А.Шукейло. Система поворота и формирования пучка на мишени медицинского линейного ускорителя электронов ЛУЭР-20М. Тезисы докладов 7-го Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Санкт-Петербург, 1992, с. 176.

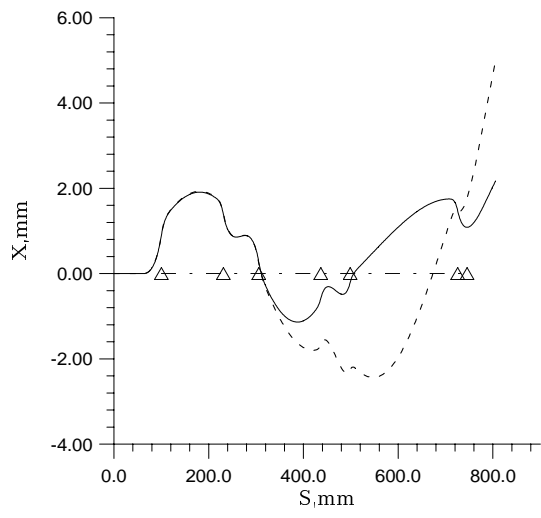


Рис. 2:

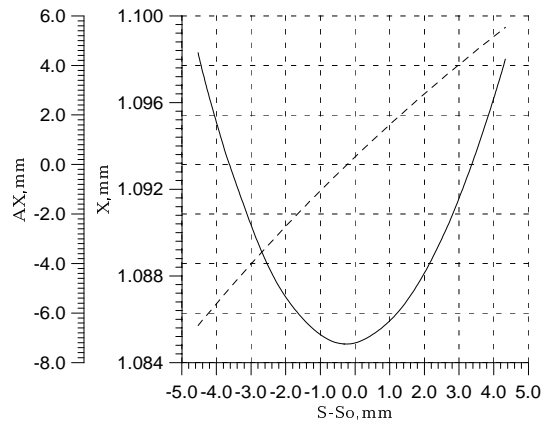


Рис. 3:

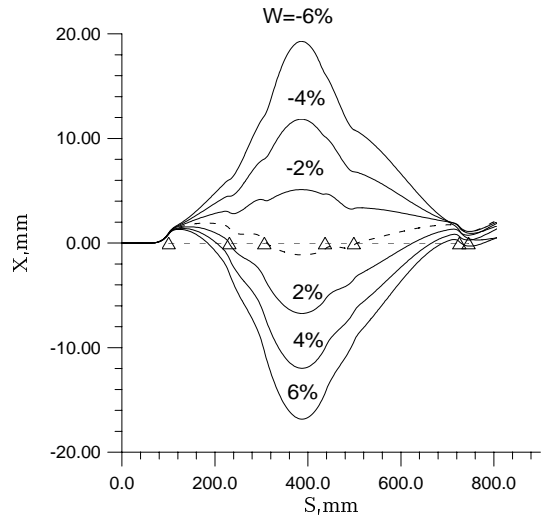


Рис. 4:

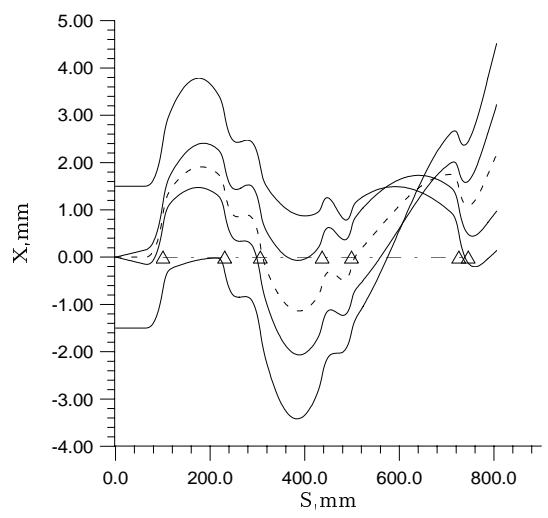


Рис. 5: