

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ В ИЯИ РАН

*С.В. Акулиничев, Ю.К. Гаврилов, О.В. Грехов, Д.Б. Лазебник,
А.В. Новиков-Бородин, В.М. Скоркин, В.Н. Васильев
ИЯИ РАН, Москва, Россия*

В ИЯИ РАН разработана и построена оригинальная система пассивного формирования пучка для протонной терапии. Система состоит из набора подвижных коллиматоров, энергетического замедлителя протонного пучка с изменяемым по толщине водным объемом, динамического модулятора пучка, аварийного и рабочего затворов пучка, болусов и т.д. Все операции производятся под управлением серводвигателей с компьютерным управлением, что обеспечивает высокую заданную точность установки оборудования на ось пучка. Система позволяет проводить облучение всех типов мишеней от глазных опухолей размером от 5 мм до глубоко расположенных больших опухолей диаметром до 100 мм. Отклонение полученной дозы от дозы, рассчитанной по плану облучения, не превышает 5%.

Лучевая терапия злокачественных опухолей на пучках протонов признана во всем мире как наиболее перспективное направление лечения для большинства локализаций опухолей. Характерными особенностями протонного пучка являются: строго ограниченный пробег частиц в тканях, высокий максимум ионизации в конце пробега (пик Брэгга), а также весьма малое боковое рассеяние. Все это позволяет создавать значительно меньшую дозу облучения на близлежащие здоровые ткани по сравнению с другими методами, что дает возможность проводить облучение опухолей в непосредственной близости от критических органов.

Ежегодно в России показано проведение курса протонной терапии около 30 тыс. пациентов, однако, существующие центры в Москве (ИТЭФ), Дубне (ОИЯИ) могут обеспечить лечением лишь 1% от этого количества больных. Поэтому создание комплекса протонной терапии в Троицке на базе имеющегося ускорителя протонов является крайне важным. Проект 1-ой очереди КПП был разработан в ГСПИ в 2001 году. Летом этого года КПП был успешно принят государственной комиссией. Проект 1-ой очереди КПП предусматривал строительство одной камеры облучения в существующем здании №25 Экспериментального комплекса ИЯИ РАН. Облучение будет проводиться горизонтальным пучком с пассивным способом формирования дозного поля (т.е. без сканирования пучка). На Рис.1 показана общая схема медицинского канала.

Оборудование медицинского протонного канала Московской мезонной фабрики расположено в экспериментальном зале здания №25.

В состав оборудования входят следующие системы:

- электромагнитный канал транспортировки пучка протонов;
- система диагностики канала транспортировки пучка;
- система стабильного питания электромагнитного оборудования;
- вакуумная система;
- система охлаждения электромагнитного оборудования;
- система охлаждения источников питания;

- система контроля параметров и управления пучком протонов.

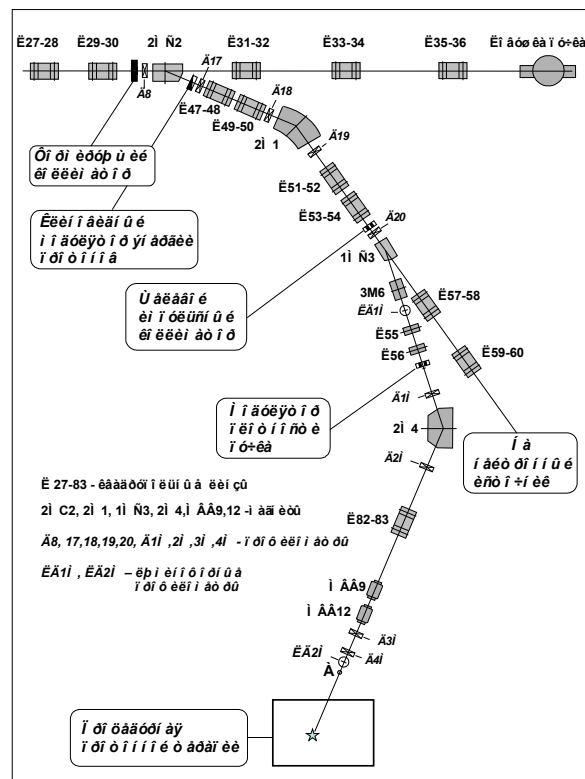


Рис.1 Медицинский канал КПП ИЯИ РАН

Основные параметры протонного терапевтического пучка

Энергия пучка	75...240 МэВ
Ток пучка	(10...100)нА (0,64...6,24)·10 ¹¹
Стабильность и однородность энергии пучка	ΔE/E ≤ (0,5...1)%
Интенсивность пучка	(0,64...6,24)·10 ¹¹ прот/сек
Поперечный размер пучка	5...100 мм
Поперечная однородность пучка	+/-2.5%
Максимальное угловое расхождение пучка в изоцентре	0.2×10 ⁻² град.

Реализованы две системы формирования пучка.

1. Система предварительного формирования пучка (СПФ).

2. Система индивидуального формирования пучка (СИФ).

Медицинский канал с СПФ рассчитывался, монтировался и управляется Лабораторией экспериментального комплекса ИЯИ под руководством М.И.Грачева.

Канал является продолжением канала транспортировки пучка протонов и H^- от магнита 2МС2. Для определения и фиксации начального размера пучка перед магнитом 2МС2 установлен дистанционно управляемый танталовый коллиматор диаметром $d=4$ мм (длина по пучку 20 мм) (Рис.1). Коллиматор вводится в вакуумный объем с точностью повторения ± 1 мм. Максимальная мощность поглощенного пучка на коллиматоре 200 Вт. Магнит 2МС2 отклоняет пучок протонов на трассу медицинского канала. Изменение энергии протонов от 240 до 70 МэВ происходит в два этапа: отключением ускорительных секций с шагом в 20 МэВ и изменением положения пучка протонов на клиновидном танталовом поглотителе сканированием тока магнита 2МС2 с шагом 0.5 А. Поглотитель установлен в вакуумном объеме перед линзами Л49-50 и вводится дистанционно на ось пучка с точностью ± 2 мм по вертикали. Мощность поглощенного пучка на поглотителе ~ 20 Вт. Компенсация изменения положения пучка осуществляется заранее известной величиной коррекции тока магнита 2М1. Для монохроматизации пучка и ограничения энергетического (импульсного) интервала до $0.3dE/E$ ($0.15 dp/p$) вместо горизонтального фокуса пучка после линзы Л54 вводится вертикальный щелевой импульсный коллиматор из тантала с размерами 4 мм по горизонтали и 150 мм по вертикали и длиной по пучку 30 мм. Мощность пучка, выделяемая на коллиматоре, 10 Вт. Он установлен в вакуумном объеме и вводится дистанционно. Для достижения равномерной плотности пучка предусмотрен модулятор плотности, который конструктивно повторяет щелевой импульсный коллиматор с тонкой рассеивающей фольгой. Модулятор используется по необходимости, с учетом измерения параметров пучка в рабочих сеансах. Протонный канал после магнита 2М4 ахроматичный. Дублет линз Л82-83 позволяет формировать параллельный пучок перед процедурой в точке «А». В таблице представлены основные характеристики протонного пучка. На Рис.2 показана схема формирования базовых пучков.

В разрезе ионопровода после квадрупольных линз Л82-83 установлен стационарный коллиматор (1) (здесь и далее по тексту Рис.2) с апертурой пропускания диаметром 100 мм. За ним следует комплект передвижных коллиматоров (2) с апертурами пропускания диаметрами $d_1=40$ мм и $d_2=70$ мм. Коллиматоры установлены на модуль линейного перемещения на шариковинтовой паре с планетарным редуктором и приводом от серводвигателя с компьютерным управлением из операторского

пульта КПП. Точность установки коллиматоров на оси пучка не хуже ± 0.05 мм. Таким образом, имеется возможность формировать базовые пучки с поперечным сечением 100, 70 и 40 мм, в зависимости от размеров мишени. За коллиматорами установлен аварийный затвор (3), который служит для блокировки пучка в аварийных ситуациях. Затвор срабатывает при нажатии аварийной кнопки на операторском пульте управления, отключении сетевого питания, срабатывании блокировки дверей и т.д. Время срабатывания не превышает 200 мс.

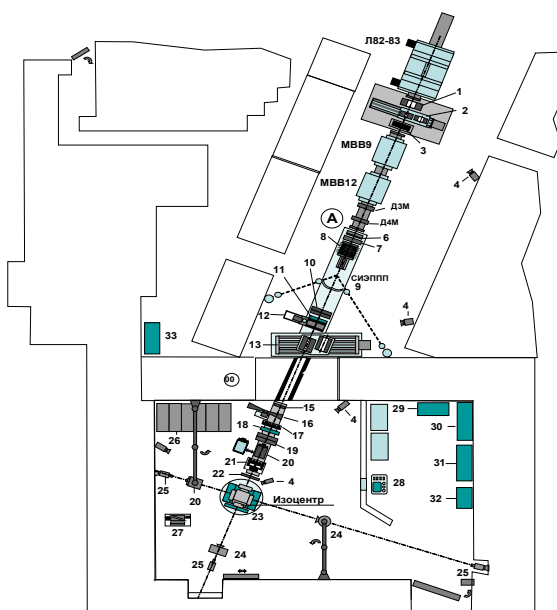


Рис.2. Комплекс протонной терапии ИЯИ.

Обозначения на рисунке, не вошедшие в текст:
4 – ТВ-камеры наблюдения; 20, 24 – рентгеновские центраторы; 25 – лазерные центраторы; 29 – электроника ионизационных мониторов; электроника управления рентгеновскими центраторами – 30, позиционером – 31 и сервоприводами – 32; 33 – электроника системы измерения энергии пучка

Магниты МВВ9, МВВ12 служат для подъема пучка на требуемую отметку. Диапазон подъема пучка 0,2...0,3 м.

Пучок с параметрами, указанными в таблице, фокусируется в точку «А», первоначально проходя через рассеиватель (6), который предназначен для улучшения поперечной однородности пучка и поглощения электрон-позитронного фона.

Монитор-профилометр (7) измеряет параметры пучка, характеризующие его интенсивность и геометрические размеры. Монитор представляет собой 32-канальную воздушную ионизационную камеру с ячеистой структурой электродов.

Водный замедлитель протонов (8) необходим для плавного подбора нужной энергии протонного пучка в интервале энергий от 70 до 200 МэВ. Замедление протонов происходит в слое воды, толщина которого может меняться от 0 до 300 мм, с точностью ± 0.5 мм. Выбор и установка заданного слоя воды и, соответ-

ственно, энергии пучка, рассчитанной системой планирования, обеспечивается изменением гофрированного объема с помощью серводвигателя с программным управлением из операторского пульта КПП.

Система измерения энергии пучка в режиме on-line (9) основана на измерении энергии упруго рассеянных протонов на ядрах мишени из CH_2 . Протон пучка с энергией в интервале 70...200 МэВ выбивает из ядра мишени другой протон. Обе частицы разлетаются в разные стороны под фиксированным углом ~ 88 градусов. Для выделения и регистрации вылетевших протонов система имеет два сцинтилляционных время-пролетных плеча, работающих на совпадения, и детектор полного поглощения из вольфрамата висмута, измеряющего выделенную в нем энергию. Система оснащена электроникой регистрации и обработки сигналов в стандарте КАМАК с передачей данных на РС. Программное обеспечение позволяет проводить расчеты энергии протонного пучка с точностью 2...5% с отображением результатов на мониторе операторского пульта управления КПП.

Монитор-профилометр (10) измеряет геометрические параметры и распределение интенсивности протонного пучка. Представляет собой многопроводную пропорциональную камеру, имеющую по 100 каналов с шагом 1 мм в двух ортогональных направлениях.

Профилометр (11) представляет собой экран из люминофора, закрепленный на рабочем затворе пучка с системой снятия и обработки цифровых сигналов на основе ПЗС-матрицы. Служит для визуального контроля геометрических параметров пучка непосредственно перед началом облучения. Информация выводится на экран монитора операторского пульта и в пультовую экспериментального комплекса.

Рабочий затвор пучка (12) по команде оператора открывает протонный пучок на пациента. Закрытие затвора происходит автоматически при наборе пациентом заданной дозы облучения. Затвор установлен на линейном реечном модуле перемещения с приводом на базе серводвигателя. Затвор имеет две позиции – открыт, закрыт. Скорость перемещения 200 мм/с.

Передвижные коллиматоры №2 (13) установлены на поворотную платформу перед коллимирующим защитным устройством. Платформа имеет механизм юстировки по трем координатам XYZ и углу с точностью не хуже +/- 0.1 мм и +/- 0.05 град. Модуль перемещения и привод коллиматоров №2 аналогичен комплекту коллиматоров №1 и также основан на серводвигателе с программным управлением. Перемещение и установка комплектов коллиматоров №1 и №2 в рабочие точки по оси пучка синхронизованы с высокой точностью и представляют собой единую систему.

Стационарный коллиматор №2 в составе коллимирующего защитного устройства КЗУ (14) предназначен для формирования базового протонного пучка с максимальной апертурой пропускания $d_1 = 100$ мм. Представляет собой стальную трубу $D=200$ мм и длиной 1200 мм со вставками из легко-

го материала (борированного полиэтилена) по всей длине.

Помимо стационарного коллиматора № 2, КЗУ состоит из усиленной части биологической защиты в непосредственной близости от него. КЗУ не только вырезает из потока протонов центральную часть заданного размера, определяемого размером внутреннего отверстия коллиматора, но и останавливает подавляющую часть вторичных частиц. Это достигается за счет использования в КЗУ чередующихся слоев металла для поглощения каскадных нейтронов и слоев легкого боросодержащего бетона для поглощения тепловых нейтронов.

Технические параметры КЗУ:

Толщина металла внешнего корпуса – 10 мм.

Плотность металлосодержащих слоев – 5.0 т/м³.

Плотность боросодержащих слоев – 2.6 т/м³.

Материал корпуса и перегородок – черная сталь.

Содержание бора в растворах (по весу) – 5%.

Общее количество поглотителя по любой траектории протонов (не менее) – 500 г/см².

Рассеиватель №2 (15). Устанавливается для улучшения поперечной однородности протонного пучка и поглощения электрон-позитронного фона. Рассчитывается по результатам измерения характеристик протонного пучка.

Динамический модулятор энергии протонов (16) предназначен для «размазки» (модуляции энергии) протонного пучка и формирования кривой Брэгга с плоской вершиной. Это достигается пропусканием протонного пучка через вещество с «пульсирующим» изменением толщины слоя в расчетных пределах ~0...50 мм. Устройство включает в себя диск из оргстекла с несколькими клиновидными по толщине секторами. Диск закреплен на валу электродвигателя с электронным управлением с частотой вращения в диапазоне 10...150 об/мин. и стабильностью не хуже 1...2%. Показания частоты вращения отображаются на электронном табло на пульте управления.

Гребенчатый фильтр (17). Данный прибор, играющий роль дополнительного модулятора энергии протонов, представляет собой замедлитель из пластика сложной конфигурации, толщина которого меняется в зависимости от поперечной протонам координаты по определенному закону. Протоны пучка, проходящие через разные участки гребенчатого фильтра, теряют различную величину энергии. При этом узкий пик Брэгга моноэнергетического пучка преобразуется в однородное дозное распределение с плоской вершиной и постоянной мощностью дозы по глубине до 8 г/см² в мягкой ткани и резким спадом дозы на границах поля, протяженность которого соответствует размерам облучаемой мишени. Конфигурация формы гребенчатого фильтра рассчитывается системой планирования облучения из условия формирования заданного глубинного дозного распределения при «смешивании» протонов после его прохождения.

Монитор пучка (18) создан на основе узкозоровой воздушной ионизационной камеры. Данный

прибор, совместно с профилометром БМОВИК, отсчитывает мониторные единицы отпускаемой пациенту дозы во время сеанса терапии и служит для калибровки профилометра БМОВИК. Детектор монитора имеет рекордные параметры ионизационной камеры:

Диаметр чувствительной области УВИК – 120 мм.
Расстояние между анодом и каждым катодом – 1 мм.
Чувствительность к среднему току протонов – 0,01 нА.
Максимальная измеряемая плотность тока – 10 нА.
Толщина пленки менее 5 мкм.

Монитор-профилометр пучка (БМОВИК) (19) предназначен для измерения и контроля геометрических параметров, распределения интенсивности протонного пучка и отпуска дозы в мониторных единицах во время облучения пациента. Прибор состоит из двух независимых многоканальных воздушных ионизационных камер, объединенных в большой монитор на основе воздушной ионизационной камеры (БМОВИК). Результатом мониторинга пучка на данном приборе являются 2 независимых измерения общей отпущенной пациенту дозы и профили пучка в двух ортогональных координатах.

Основные параметры БМОВИК:

Чувствительная область 90×90 мм.
Количество градаций по оси абсцисс 30, шаг 3 мм.
Количество градаций по оси ординат 30, шаг 3 мм.
Количество вещества на пути пучка 3 мг/см².
Чувствительность по средней плотности тока 0,012 нА/см².
Максимальная измеряемая плотность тока 1,2 нА/см².
Общее количество обслуживаемых каналов до 62.
Дополнительное число электронных каналов усиления – 16.
Количество каналов для измерения интегральных ионизационных потерь – 2.
Диапазон юстировки в обоих направлениях – 20 мм.
Данные по профилям пучка и отпущенной дозе поступают в программируемую систему контроля облучения, и на их основе вырабатывается автоматический сигнал о выключении пучка после набора заданной дозы, или при нарушении однородности пучка по интенсивности.

Блок формирования пучка (21) является окончательным формирующим пучок устройством. Блок включает в себя индивидуально изготовленные формирующие приспособления: болус из акрила или сходного пластика, индивидуально изготовленный коллиматор из сплава Вуда или латуни (для глазных мишеней), дополнительный гребенчатый фильтр с индивидуальной модуляцией пучка. Все эти устройства изготавливаются индивидуально по плану облучения и фиксируются в корпусе блока формирования пучка, установленного на оптической скамье.

При облучении пациента данный блок занимает положение на оптической скамье, максимально приближенное к изоцентру.

Опорный модуль позиционирующего устройства (23) является базовым элементом системы фиксации, позиционирования и перемещения пациента. Предназначен для позиционирования пациента в базовую точку центрации, заданную планом облучения, и последующего вращения пациента вокруг изоцентра.

Основные параметры ОМПУ:

Вертикальное перемещение оси Z – 300 мм.
Горизонтальное перемещение осей X,Y +/- 150 мм.
Поворот относительно оси Z (угол гамма) +/- 180 градусов.
Дискретность перемещения по всем линейным координатам – 0,1 мм.
Дискретность поворота по углу гамма – 0,1 градус.
Повторяемость позиций:
линейных +/- 0,05 мм.
угловых +/- 0,05 градуса.
Скорость линейных перемещений 0,1...25 мм/с.

Для абсолютной и относительной калибровки конвертера пробега и мониторов протонного пучка создан анализатор дозного поля терапевтического протонного пучка на основе водного фантома WP60, ионизационных камер, контроллера PHILIPS DUAL Processor (27). С помощью анализатора дозного поля измеряются 3-мерные дозовые распределения с целью определения качества терапевтического протонного пучка, абсолютной и относительной калибровки для обеспечения выполнения требования конформности подводимой к пациенту дозы.

Статья поступила в редакцию 28.09.2007 г.

THE BEAM FORMATION SYSTEM FOR PROTON THERAPY AT INR RAS

S.V.Akulnichev, Yu.K.Gavrilov, O.V.Grekhov, D.B.Lazebnik, A.V.Novikov-Borodin, V.M.Skorin, V.N.Vasiliev

An original passive-scattering system of individual beam formation for proton therapy at INR of RAS was developed and created. The system contains a set of mobile collimators, an energy degrader with a variable-thickness water column, a dynamic range modulator, emergency and routine shutters, boluses, brush filters etc. Servo motors and computer control of all operations provides the required quality assurance. The system will allow to irradiate all kind of targets from eye tumours up to deep sited large tumours of about 10 cm in diameter. The deviation of a dose from the treatment plan is expected within 5%.

СИСТЕМА ФОРМУВАННЯ ПУЧКА ДЛЯ ПРОТОННОЇ ТЕРАПІЇ В ІЯД РАН

С.В. Акулінічев, Ю.К. Гаврилов, О.В. Грехов, Д.Б. Лазебник, А.В. Новиков-Бородін, В.М. Скоркін, В.Н. Васильєв

В ІЯД РАН розроблена та створена оригінальна система пасивного формування пучка для протонної терапії. Система складається з набору пересувних коліimatorів енергетичного сповільнювача протонного пучка зі змінним по товщині водяним об'ємом, динамічного модулятора пучка, аварійного та робочого затворів пучка, болусів і т.п. Всі операції виконуються серводвигунами з комп'ютерним керуванням, що забезпечує задану точність. Система дозволяє проводити опромінення усіх типів мішеней від пухлин очей розміром від 5 мм до глибоко розташованих великих пухлин діаметром до 10 см. Відхилення отриманої дози від дози, розрахованої по плану опромінення, не перевищує 5%.