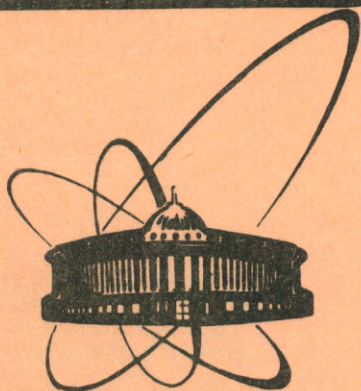


88-207



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

A731

18-88-207

В.М.Абазов, Б.В.Астрахан, В.П.Зорин,
О.Л.Климов, И.И.Клочков, Г.В.Мицын,
А.Г.Молоканов, О.В.Савченко

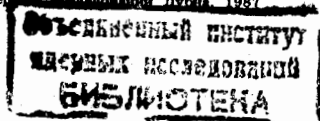
**ФОРМИРОВАНИЕ
УЗКОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА
ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ
И АППАРАТУРА ДЛЯ РЕКОНСТРУКТИВНОЙ
ПРОТОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

1988

I. Введение

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ совместно с ВОНЦ АМН СССР ведутся работы по созданию установки для протонной реконструктивной томографии. В работах /1,2/ описан один из вариантов такой установки для энергии протонов 240 МэВ. Измерения проводились одним спинтилляционным детектором с использованием дополнительного замедлителя переменной толщины, работающего на связи с ЭВМ. Принцип измерения тормозной способности исследуемого объекта был основан на следующем. Для каждого положения исследуемого объекта, расположенного на ротационном стенде, устанавливалась такая толщина дополнительного замедлителя, при которой суммарная толщина замедлителя и исследуемого объекта соответствовала бы выбранной рабочей точке на кривой Брэгга (обычно выбираемой равной 50%-му уровню дозы на спаде кривой). Информация о положении ротационного стенда с исследуемым объектом и соответствующей этому положению толщине дополнительного замедлителя записывалась в память ЭВМ для последующей математической обработки и получения томографического изображения.

Несовершенством этой установки является большое время измерения (несколько часов), связанное в основном с инерцией механических узлов ротационного стенда и поглотителя переменной толщины, а также недостаточное пространственное разрешение, обусловленное помимо собственной ширины пучка (около 13 мм) многократным кулоновским рассеянием протонов в исследуемом объекте (для бесконечно тонкого пучка с энергией 230 МэВ уширение составляет ~ 14 мм после прохождения 30 см воды).



В настоящей работе дается описание метода формирования узкого протонного пучка энергией 660 МэВ для диагностических целей и нового варианта экспериментальной установки для реконструктивной протонной томографии, свободной от указанных недостатков, а также приводятся результаты первых испытаний этой установки на сформированном пучке.

2. Получение узкого протонного пучка для диагностических целей

Для проведения исследований на новом варианте опытной установки для реконструктивной протонной томографии в процедурной кабине № I был сформирован узкий пучок протонов с энергией 660 МэВ. Для получения пучка используются те же магнитооптические элементы, что и для формирования замедленных протонных пучков.

Схема канала для формирования узкого пучка для протонной томографии изображена на рис. 1. Выведенный из камеры

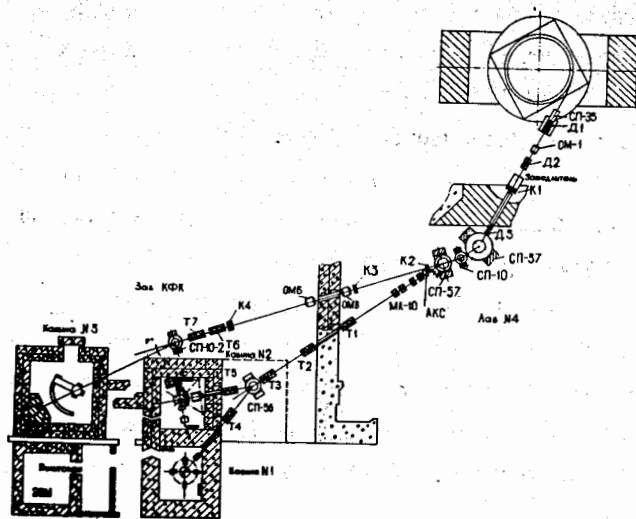


Рис. 1

фазотрона протонный пучок с помощью двух отклоняющих магнитов СП-35 и ОМ-1 и двух дублетов квадрупольных линз Д1 и Д2 фокусируется и направляется на коллиматор K_1 , расположенный внутри защиты на выходе углеродного замедлителя и предназначенный для уменьшения эмиттанта пучка. Три магнита СП-37, СП-10 и СП-57 отклоняют пучок на углы 32° ; $9,5^\circ$ и $14,5^\circ$ соответственно. Дублет квадрупольных линз Д3 фокусирует пучок на коллиматор K_2 шириной 3 мм и высотой 4 мм, осуществляющий импульсный анализ. Квадрупольные триплеты T_2 , T_3 и T_4 формируют изображение коллиматора K_2 в центре ротационного стенда в кабине № I. Отклоняющий магнит СП-56 поворачивает пучок в кабину.

Отличительной особенностью такого метода формирования узкого протонного пучка является отсутствие коллиматора перед исследуемым объектом, что полностью исключает фон вторичных частиц от стенок такого коллиматора, приводящий к дополнительной дозовой нагрузке при диагностических процедурах.

Основными факторами, увеличивающими поперечные размеры пучка, являются сферические aberrации квадрупольных триплетов и многократное кулоновское рассеяние в выходной фольге вакуумного канала и в воздухе за ней. Для уменьшения влияния сферических aberrаций была уменьшена апертура канала - в триплет T_2 вставлялся коллиматор диаметром 2 см. Многократное кулоновское рассеяние было уменьшено продлением вакуумного канала до ротационного стенда.

Для предварительного определения формы поперечного сечения пучка проводилась экспозиция фотобумаги, на которой после проявления оставался радиоавтограф пучка. Однако этот метод может служить только для качественных наблюдений, так как не обеспечивает линейной зависимости потока протонов в пучке.

Измерения поперечного сечения пучка проводились миниатюрным (1 мм x 1 мм) полупроводниковым детектором, перемещаемым по командам от ЭВМ. Результаты этих измерений (рис. 2) представляются в виде избуровой плотности потока протонов в поперечном сечении пучка, расположенных через каждые 10% от максимального значения. Размеры пучка по

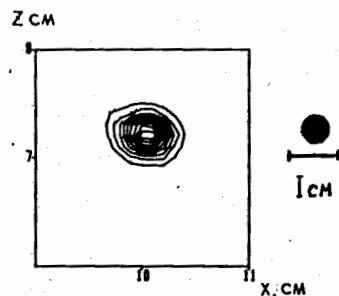


Рис. 2

50%-му изоуровню составляют 3,8 мм по горизонтали и 2,8 мм по вертикали. Справа на рисунке представлен радиоавтограф этого пучка, полученный при экспозиции фотобумаги.

Выбранная максимальная энергия протонного пучка позволяет существенно уменьшить эффект многократного кулоновского рассеяния протонов в исследуемом объекте и тем самым повысить пространственное разрешение до практически приемлемого значения (3+5 мм). Для энергии протонов 660 МэВ ширина пучка на полувысоте после прохождения слоя воды толщиной 30 см составляет 4,7 мм (без учета начальной ширины пучка), что в три раза меньше, чем при энергии протонов 240 МэВ.

Увеличение энергии протонного пучка приводит, однако, к увеличению дозы в исследуемом объекте при диагностических процедурах при условии сохранения разрешения по плотности. Это обусловлено увеличением страттлинга протонов до значения ~ 18 мм, а также ядерным рассеянием протонов в веще-

стве, находящемся на пути пучка (исследуемый объект, дополнительный замедлитель, сцинтилляторы блока детекторов). Несложный расчет показывает, что последнего счетчика достигает лишь $\sim 0,1$ часть всех протонов, пересекающих исследуемый объект.

В то же время существенно лучшее пространственное разрешение при энергии 660 МэВ однозначно определяет выбор этой энергии для большинства задач клинической топометрии.

3. Описание установки

Новый вариант установки для протонной реконструктивной томографии (рис. 3) включает в себя следующие элементы: блок детекторов, дополнительный замедлитель постоянной толщины, мониторный счетчик, ротационный узел устройства "Мезон", работающий на связи с ЭВМ НР-21МХ, крейт КАМАК, стойка высоковольтного питания ФЭУ, а также различные устройства отображения информации.

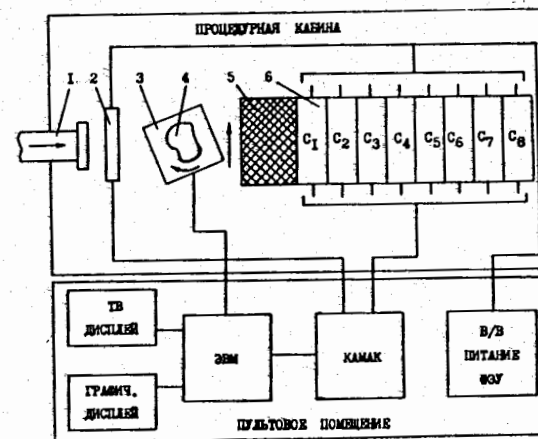


Рис. 3. Общая схема установки. 1 - вакуумный канал, 2 - мониторный счетчик, 3 - стенд устройства "Мезон" с дополнительным узлом вращения, 4 - исследуемый объект, 5 - дополнительный поглотитель постоянной толщины, 6 - блок детекторов.

Применение большого стационарного детектора, перекрывающего по пробегу весь возможный диапазон изменения пробега протонов (до 90 см воды) и дополнительного узла вращения на установке "Мезон", обеспечивающего непрерывное движение исследуемого объекта, позволило отказаться от замедлителя переменной толщины и существенно (с нескольких часов до 10+15 мин) сократить время измерения проекционных данных.

Блок детекторов состоит из 8 органических сцинтилляторов, работающих совместно с фотоумножителями ФЭУ-30. Размеры сцинтилляторов в поперечном направлении 30 см x 30 см обеспечивают полное перекрытие пучка, расширяющегося за счет многократного кулоновского рассеяния. Размер 12 см вдоль оси пучка определяется размерами ФЭУ.

Дополнительный замедлитель выполнен из латуни и расположен непосредственно перед блоком детекторов. Его толщина выбрана такой, что при отсутствии на пути пучка исследуемого объекта все протоны останавливаются в последнем детекторе. В случае, когда пучок пересекает исследуемый объект, пробег протонов уменьшается, что приводит к изменению амплитуды сигналов, регистрируемых с ФЭУ. Этому изменению сопоставляются определенные потери энергии или толщина в исследуемом объекте.

Мониторный счетчик выполнен из тонкого (2 мм) органического сцинтиллятора, работающего совместно с фотоумножителем ФЭУ-30. Счетчик расположен за вакуумопроводом перед исследуемым объектом. Его показания используются для нормирования сигналов фотоумножителей блока детекторов.

Для организации непрерывного вращения и поперечного перемещения исследуемого объекта используются конструктивные элементы устройства "Мезон" /3/, разработанного для осуществления на связи с ЭВМ сканирующего ротационного облучения глубоко расположенных опухолей на статическом горизонтальном пучке протонов, а также дополнительно разработаный узел вращения объекта вокруг вертикальной оси с системой точного определения текущей угловой координаты. Используются 4 степени свободы: 2 поперечных горизонтальных и вертикальное перемещение стенда, а также его вращение вокруг перемещающейся вертикальной оси с угловой скоростью от 0,03 до 2 об/с. Текущие значения координат преобразуются в цифровой код схемой, входящей в состав устройства "Мезон", и дополнительного узла вращения объекта, и поступают в ЭВМ.

Предложенная схема движения исследуемого объекта под неподвижным горизонтальным пучком протонов, показанная на рис. 4, позволяет перейти от прерывистого движения в традиционной схеме рентгеновских томографов первого поколения (поперечное перемещение, затем поворот на малый угол, затем снова поперечное перемещение и т.д.) к непрерывному движению объекта, когда за один оборот вращения происходит

поперечное смещение на ширину протонного пучка. Это отвечает более комфортным условиям при проведении диагностических процедур и устраняет дополнительные неточности, связанные с инерциальными смещениями различных участков объекта при реверсивных движениях.

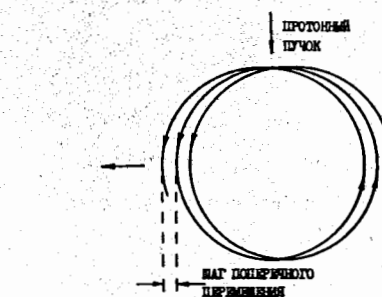


Рис. 4

Блок-схема системы сбора данных с фотоумножителей блока детекторов и монитормого счетчика представлена на рис. 5.

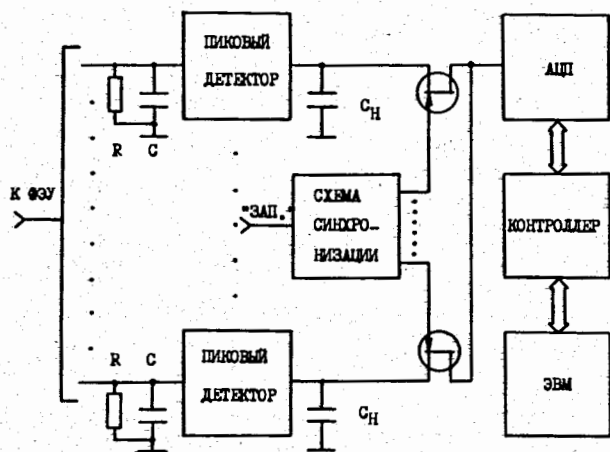


Рис. 5

Сигналы с анодов ФЭУ поступают в специально разработанный блок, выполненный в стандарте КАМАК, в котором они частично интегрируются входными RC-цепями и запоминаются на накопительных емкостях C_H . В промежутках между импульсами ускорителя емкости каждого из 9 каналов с помощью полевых транзисторов последовательно подключаются к входу 12-битового АЦП КА007 /4/. После завершения цикла опроса ($\sim 1,5$ мс) с помощью тех же транзисторов производится сброс в нулевое состояние накопительных емкостей, и схема готова к приходу следующего импульса ускорителя. Связь с ЭВМ осуществляется через стандартный контроллер КК001 /5/.

Для визуального отображения реконструированной информации используются полутоновый черно-белый и цветной видеомониторы, а также графопостроитель, работающие на линии с ЭВМ НР-21МХ.

4. Методика измерений

Для того, чтобы с хорошей точностью ($\leq 1\%$) определять толщину вещества на пути пучка, необходимо знать зависимость

между энергией протонов перед замедлителем постоянной толщины и сигналами фотоумножителей блока детекторов (рис. 6).

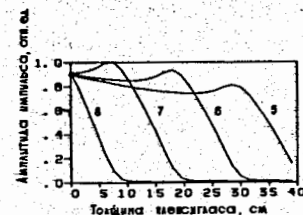


Рис. 6

Такая зависимость устанавливается при вертикальном перемещении пирамиды из плексигласа на стенде установки "Мезон" подобно тому, как это сделано в рентгеновском томографе /6/. При таком способе измерения автоматически учитываются погрешности, связанные с уменьшением интенсивности протонного пучка из-за ядерного взаимодействия, многократным кулоновским рассеянием в исследуемом объекте, нелинейностью ФЭУ и др.

Измерение проекционных данных, состоящих из набора потерь энергии протонов в исследуемом объекте, производится при вращении ротационного стенда с частотой $\sim 0,3$ об/с с одновременным его перемещением в горизонтальной плоскости с шагом, равным ширине протонного пучка (около 5 мм) в направлении, перпендикулярном пучку. Измерения амплитуд сигналов фотоумножителей проводятся через каждые 2° угла поворота исследуемого объекта. Для уменьшения статистических погрешностей для каждого измерения производится усреднение данных по трем макроимпульсам ускорителя. Весь процесс протекает автоматически по командам от ЭВМ и занимает 10+15 мин.

После математической обработки результаты измерений в виде матрицы реконструированного изображения размером 128×128 выводятся на одно из устройств отображения информации.

5. Программное обеспечение

Для проведения измерений на протонном томографе и визуального отображения результатов создан ряд программ.

Программа PRB предназначена для автоматического измерения калибровочной кривой. Она управляет вертикальным перемещением стенда устройства "Мезон" с плексигласовой пирамидой, считывает информацию с АЦП об амплитудах сигналов фотомножителей и в обработанном виде записывает на сменный магнитный диск.

Программа РЮ управляет вращением и поперечным перемещением исследуемого объекта. Шаг и количество перемещений задаются оператором с терминала. Вся информация записывается на магнитный диск.

Программа LAP осуществляет переход от амплитуд сигналов фотомножителей к потерям энергии и толщинам в исследуемом объекте, используя калибровочную кривую, измеренную с помощью программы PRB.

Восстановление томографических изображений объектов по проекционным данным осуществляется программой PRIM, в основе которой лежит алгоритм реконструкции сверточного типа для параллельных пучков. Время восстановления одного изображения не превышает 10 мин.

Матрица изображения размером 128x128 высвечивается на экранах черно-белого либо цветного дисплея программами TV и TC соответственно. Диапазоны величин тормозной способности или плотности, соответствующие определенным градациям яркости либо цвета, задаются оператором с терминала.

6. Результаты фантомных измерений

Первые испытания нового варианта реконструктивного протонного томографа проводились на двух фантомах различ-

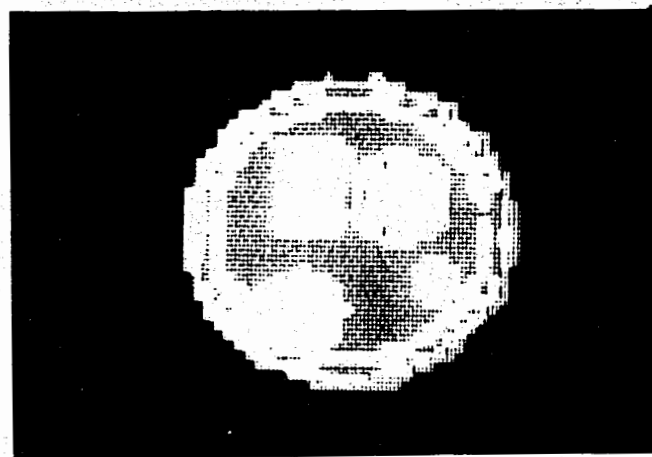


Рис. 7

ных размеров и конфигураций. На рис. 7 представлена томограмма цилиндрического фантома с внешним диаметром 15 см. Стенки выполнены из органического стекла толщиной 1 см ($\rho = 1,18$). Внутри фантома находятся три цилиндра: плексигласовый, тефлоновый ($\rho = 2,17 \text{ г/см}^3$) и пенопластовый ($\rho = 0,3 \text{ г/см}^3$), а также плексигласовый параллелепипед. Остальное пространство фантома заполнено водой.

Второй фантом имитирует органы грудной клетки человека. Он состоит из фторопластовой трубки (имитирующей позвоночник) и двух пенопластовых параллелепипедов (моделирующих легкие), помещенных в сосуд с водой, представляющий собой эллиптический цилиндр, боковые стенки которого выполнены из тонкого органического стекла.

На рис. 8 показано реконструированное изображение этого фантома. На томограмме отчетливо проявляются отверстия, имеющиеся в пенопластовых параллелепипедах диаметром 9 мм, три из которых заполнены водой, а одно - воздухом. Также хорошо различимо отверстие в тефлоновой трубке диаметром 9 мм.

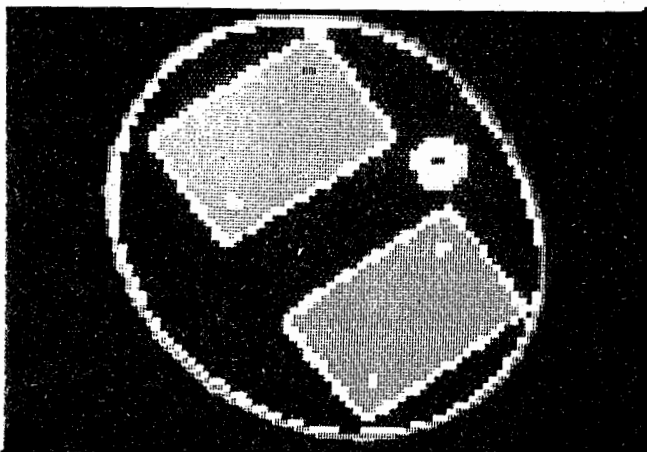


Рис. 8

Из этих предварительных фантомных измерений можно заключить, что ошибка в определении тормозной способности различных элементов исследуемого объекта не превышает 3% на уровне воды при пространственном разрешении ~ 5 мм.

7. Выводы

В новом варианте установки для протонной компьютерной томографии существенно (примерно на порядок) сокращено время, необходимое для получения проекционных данных, значительно (в 3-4 раза) улучшено пространственное разрешение томографического изображения исследуемого объекта и созданы более благоприятные, комфортные условия для проведения диагностических процедур.

Установка позволит в будущем откалибровать рентгеновский компьютерный томограф /6/ путем перехода от коэффициентов ослабления рентгеновского излучения к эквивалентным длинам пробега протонов в исследуемом объекте и тем самым повысить точность клинической топометрии при планировании протонной терапии.

В заключение авторы выражают благодарность члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову за содействие в проведении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, 18-80-746, Дубна, 1980.
2. Абазов В.М. и др. Авт.свид. СССР № 867162 от 21.05.1981, Бюлл. ОИПОТЗ, 1982, № 14, с.324.
3. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, 18-80-156, Дубна, 1980.
4. Антюхов В.А. и др. ОИЯИ, 10-80-650, Дубна, 1980.
5. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-7332, Дубна, 1973.
6. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, 13-87-702, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 марта 1988 года.