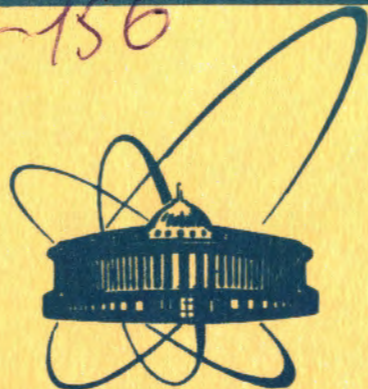


2799/2-80

23/vi-80

80-156



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

18-80-156

**В.М.Абазов, Г.А.Андреев, Б.В.Астрахан,  
Т.С.Гаврилова, И.И.Клочков, С.А.Кутузов,  
В.И.Пахомов, Г.П.Решетников, О.В.Савченко,  
В.Г.Сухов**

**АППАРАТУРА НА ЛИНИИ С ЭВМ  
ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО РОТАЦИОННОГО  
ОБЛУЧЕНИЯ  
НА ПУЧКАХ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

**1980**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

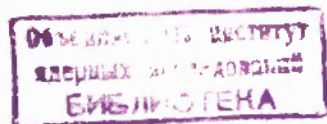
Протоны высоких энергий с точки зрения их возможного использования в лучевой терапии являются в настоящее время наиболее хорошо изученными тяжелыми заряженными частицами. По сравнению с пучками гамма-квантов и электронов протонные пучки имеют существенно более локализованное дозное распределение, которое легко поддается регулированию в соответствии с теми или иными клиническими требованиями или критериями.

Для того, чтобы в полной мере использовать это важное преимущество протонных пучков в широкой клинической практике, необходимо разработать методы автоматического совмещения дозного максимума /пика Брэгга/ с опухолью и способы контроля этой процедуры.

Так, например, при ротационном облучении глубоко залегающих опухолей пучками протонов или других тяжелых заряженных частиц требуется непрерывно корректировать их пробег так, чтобы пик Брэгга находился внутри пределов патологического очага. Вести такую корректировку вручную в реальном масштабе времени невозможно, так как при вращении объекта /пациента/ под протонным пучком, состав тканей, через которые проходит пучок, непрерывно меняется, а их суммарная тормозная способность в каждом направлении облучения неизвестна.

Первый шаг в направлении разработки автоматических методов облучения пациентов был сделан в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ при участии сотрудников Онкологического научного центра /ОНЦ/ и Центрального конструкторского бюро /ЦКБ/ АМН СССР. При протонной терапии опухолей пищевода был применен метод непрерывного ротационного облучения с автоматическим удерживанием пика Брэгга в пределах очага поражения /устройство "Протон"/<sup>1-3,17/</sup>. При таком методе в просвет пищевода, в точку пересечения оси ротации объекта с осью протонного пучка, вводят миниатюрный полупроводниковый кремниевый детектор, сигнал которого используют для автоматического регулирования энергии протонного пучка. Автоматическая система совмещает пик Брэгга с детектором и компенсирует во время вращения объекта облучения под пучком все изменения глубины залегания опухоли или тормозной способности тканей, лежащих на пути протонного пучка /8/.

Практическая проверка, произведенная во время ротационного облучения рака пищевода протонами 200 МэВ на медицинском протонном пучке ЛЯП ОИЯИ, показала, что метод может обеспечить



точную локализацию пика Брэгга в центре ротации и существенно снизить лучевую нагрузку на нормальные ткани<sup>3,4</sup>. Однако в связи с применением сравнительно больших полей облучения эту процедуру необходимо вести в несколько приемов, "позажно". Требуется значительное время на повторную юстировку больного вручную, во время которой возникает опасность его смещения из заданного положения и растет вероятность неправильной стыковки этажей облучения.

Указанный метод облучения было намечено усовершенствовать и применить при проведении широких клинических испытаний в многокабинном комплексе Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ после завершения реконструкции синхротрона в ультраточный фазотрон<sup>5</sup>. В настоящее время совместно с ЦКБ АМН СССР и ОНЦ АМН СССР разработана новая установка "Мезон" с системой рентгеновской и оптической центрации<sup>4</sup>, позволяющая осуществлять на линии с малой ЭВМ ротационное облучение опухолей сложной формы с автоматическим совмещением дозного максимума с очагом поражения и автоматическим регулированием ширины дозного максимума в соответствии с формой и размерами опухоли<sup>6,16</sup>. Установка будет размещена в одном из процедурных помещений многокабинного комплекса.

Аппаратура, предназначенная для ротационного сканирования, в значительной мере свободна от упомянутых выше недостатков устройства "Протон". Облучение предполагают проводить горизонтальным, параллельным пучком протонов, сечение которого меньше размеров опухоли, путем непрерывного ротационного сканирования заданного объекта облучения под неподвижным протонным пучком. Во время перехода пучка со строки на строку дистанционно изменяются горизонтальные координаты объекта облучения, а внутриполостной датчик перемещается по вертикали так, чтобы он попеременно совмещался с центром ротации каждой строки сканирования.

За счет применения пучков протонов сравнительно небольшого сечения и облучения больших опухолей в один прием, без переюстировки больного, установка "Мезон" повысит точность локализации пика Брэгга по всему объему опухоли и особенно точность стыковки этажей. При этом существенно сократится общее время облучения.

Целью настоящего сообщения является описание основных характеристик установки "Мезон", его отладки на линии с малой ЭВМ и анализ результатов фантомных испытаний этой установки в режиме "запись" и "воспроизведение" на медицинском протонном пучке Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА "МЕЗОН"

На рис.1 и 2 представлены общий вид и блок-схема установки "Мезон", состоящей из следующих основных частей:

1. Ротационный стенд /РС/, на котором крепится кресло для укладки пациента. Двигатели DX, DY, DZ, D $\alpha$ , закрепленные на ротационном стенде, позволяют перемещать кресло в горизонтальной плоскости /координаты X, Y/, по вертикали /координата Z/, а также вокруг вертикальной оси /угол поворота  $\alpha$ /. Координаты положения кресла измеряются с помощью датчиков X, Y, Z,  $\alpha$ . В качестве датчиков для измерения координат используются индукционные фазовращатели ИФ-126.

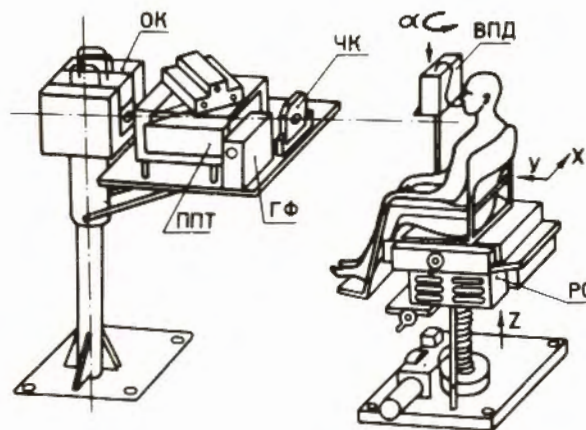
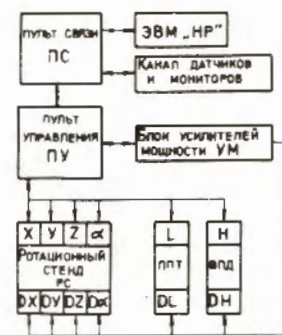


Рис.1. Установка "Мезон": ОК - основной коллиматор, ЧК - чистой коллиматор, ППТ - поглотитель переменной толщины, ГФ - гребенчатый фильтр, ВПД - внутриполостной полупроводниковый детектор, РС - ротационный стенд, X, Y, Z,  $\alpha$  - координаты положения кресла ротационного стенда.

Рис.2. Общая блок-схема установки "Мезон":

X, Y, Z,  $\alpha$  - датчики координат положения кресла на ротационном стенде; DX, DY, DZ, D $\alpha$  - шаговые двигатели для перемещения кресла вдоль координат X, Y, Z,  $\alpha$  соответственно; ППТ - поглотитель переменной толщины; L - датчик толщины ППТ; DL - шаговый двигатель для изменения толщины ППТ; ВПД - внутриполостной полупроводниковый детектор; H - датчик положения детектора; DH - шаговый двигатель для изменения положения детектора.



2. Поглотитель переменной толщины /ППТ/ устанавливается на пучке протонов перед ротационным стендом и предназначается для наведения пика Брэгга на облучаемую мишень. На рис.3 схематически показан принцип действия ППТ. Поглотитель переменной толщины представляет собой прямоугольный параллелепипед, заполненный водой, в котором размещены две прямые треугольные геометрические призмы, заполненные воздухом. Эти призмы могут перемещаться в противоположных направлениях вдоль диагонали параллелепипеда с помощью двигателя ДЛ, а результирующая толщина воды на пути протонного пучка измеряется датчиком L.

3. Узел внутриволнового полупроводникового детектора /ВПД/ предназначен для введения в полость тела пациента полупроводникового кремниевого детектора, измеряющего мощность дозы в области облучаемой мишени. Детектор располагается внутри трубки из эластичного материала и может перемещаться вдоль трубки с помощью двигателя ДН, при этом имеется возможность определения его положения датчиком Н.

4. Электронный пульт управления /ПУ/ служит для съема и индикации сигналов с датчиков координат, индикации рабочего положения электромеханических узлов устройства "Мезон", а также для управления запуском шаговых двигателей. Пульт управления работает как в автоматическом режиме /по команде ЭВМ/, так и в автономном режиме /ручное управление запуском двигателей с помощью выносного кнопочного пульта или с помощью кнопок на ПУ/. На рис.4 представлена общая схема измерения одной из координат и запуска двигателя для перемещений одного из подвижных узлов устройства "Мезон". Штрих-линией помечен блок, не входящий в схему пульта управления.

5. Канал ВПД и монитора /М/ служит для определения мощности дозы в центре ротации с помощью полупроводникового детектора, для измерения интенсивности протонного пучка и для синхронизации цикла измерения с циклом ускорения протонов в синхроциклотроне. На рис.5 представлена общая блок-схема этого канала.

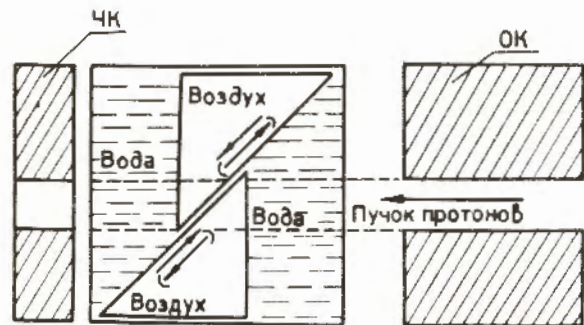


Рис.3. Схематический чертеж поглотителя переменной толщины:  
ОК - основной коллиматор, ЧК - чистовой коллиматор.

Рис.4. Блок-схема измерения координат и запуска шаговых двигателей. ФВ - фазовращатель индукционный, УМ - усилитель мощности, ШД - шаговый двигатель.

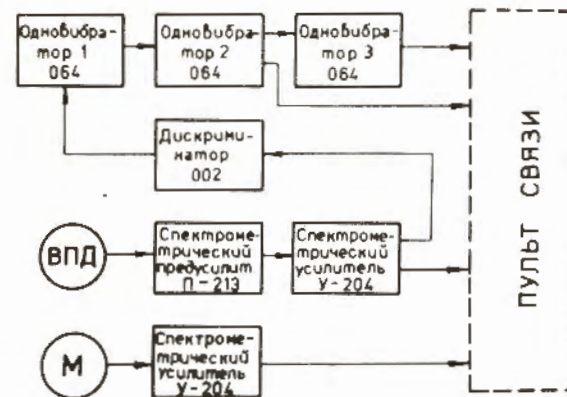
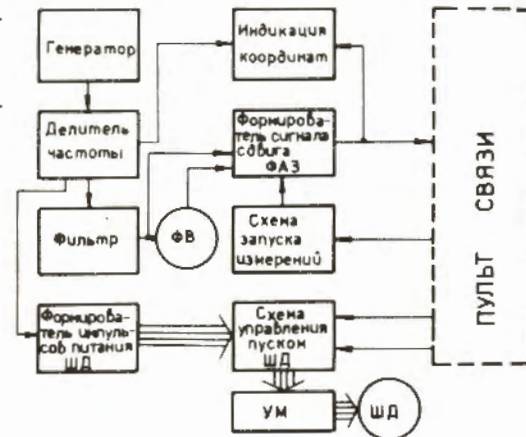


Рис.5. Блок-схема канала ВПД и монитора:  
ВПД - внутриволновой полупроводниковый детектор, М - монитор протонного пучка.

В качестве монитора протонного пучка используется ионизационная камера или сцинтилляционный счетчик толщиной около 5 мм, перекрывающий своим рабочим сечением поперечное сечение пучка. Сигнал монитора через спектрометрический усилитель У-204<sup>/8/</sup> поступает на вход кодировщика КА001<sup>/9/</sup>, входящего в пульт связи.

В качестве внутриволнового детектора мощности дозы используется полупроводниковый литий-кремниевый детектор с чувствительным объемом от 3 до 10 мм<sup>3</sup>. Сигнал ВПД через спектрометрический предусилитель П-213<sup>/10/</sup> и усилитель У-204<sup>/8/</sup> поступает на второй вход кодировщика КА001<sup>/9/</sup>, а также на вход дискриминатора 002<sup>/11/</sup>, который по переднему фронту этого сигнала фор-

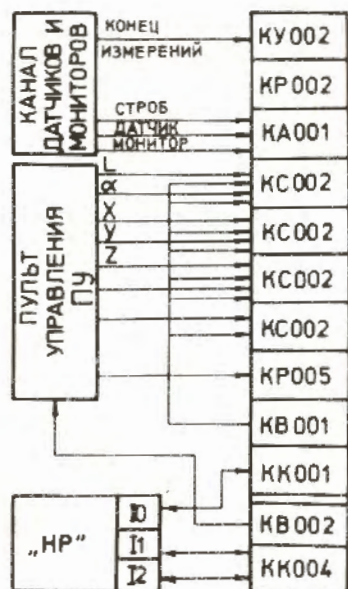


Рис.6. Блок-схема организации цикла измерения и обмена информацией с ЭВМ при помощи пульта связи.

мирует логический сигнал. Этот сигнал проходит через первый одновибратор 064<sup>/12/</sup>, используемый для задержки сигнала на время одного цикла ускорения синхроциклотрона, и поступает на второй одновибратор, который формирует управляющий сигнал для кодировщика КА001<sup>/9/</sup> с длительностью, равной длительности макроимпульса протонного пучка. Этот сигнал используется также для запуска измерения координат. Третий одновибратор 064<sup>/12/</sup> формирует сигнал конца измерений координат подвижных узлов устройства "Мезон".

6. Пульт связи /ПС/ предназначен для обмена информацией между ЭВМ и пультом управления. ПС собран на двух "крейтах" стандарта КАМАК. В качестве функциональных блоков использованы электронные блоки, разработанные в отделе автоматизации физических экспериментов Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ<sup>/7,9,13-15/</sup>. На рис.6 приведена функциональная блок-схема пульта связи.

Каждый цикл обмена информацией между ЭВМ и ПУ происходит следующим образом:

а/ ЭВМ через контроллер КК004<sup>/13/</sup> и выходной регистр КВ002<sup>/13/</sup> засылает в ПУ команду на запуск шаговых двигателей и на измерение координат.

б/ ПУ подает на управляющие входы двоичных счетчиков КС002<sup>/7/</sup> сигналы с длительностью, пропорциональной измеряемым координатам, при этом на счетные входы этих счетчиков подаются импульсы с частотой 10 МГц из генератора КВ001<sup>/13/</sup>. Сигналы монитора и

ВПД, пропорциональные интенсивности протонного пучка и мощности дозы, измеряются кодировщиком КА001<sup>/9/</sup>.

в/ ПУ формирует сигнал конца цикла обмена, который через блок внешнего управления КУ002<sup>/18/</sup> поступает на контроллер КК001<sup>/7/</sup> и вызывает считывание результатов измерений в ЭВМ.

### 3. ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ "МЕЗОН"

Подготовка и облучение пациента должны проводиться в двух основных режимах работы устройства "Мезон": в режиме "запись" и в режиме "воспроизведение". Конечным результатом первого из этих режимов является измерение кривой гетерогенности, т.е. зависимости толщины слоя воды в поглотителе, необходимой для наведения пика Брэгга на опухоль, от направления облучения. Второй режим - облучение согласно полученной кривой гетерогенности.

Для наладки устройства "Мезон" и отработки режимов "запись" и "воспроизведение" были составлены программы, объединенные в общую систему и обеспечивающие управление следующими процедурами:

1. Проверки функциональных блоков пульта связи.
2. Измерения горизонтального и вертикального профиля протонного пучка.
3. Измерения стандартных отклонений величин координат в заданной точке.
4. Измерения отношения и его стандартного отклонения сигналов ВПД и монитора для фиксированных значений угла поворота РС и толщины ППТ.
5. Измерения кривой Брэгга.
6. Измерения кривой гетерогенности.
7. Воспроизведения кривой гетерогенности.

### 4. ИСПЫТАНИЕ УСТАНОВКИ "МЕЗОН"

Работа с установкой "Мезон" показала, что точность определения координат положения подвижных узлов составила  $\sim 1\%$  от их максимального значения. При этом основной вклад в ошибку вносит нелинейность датчиков положения. Ее учет при обработке результатов позволяет уменьшить ошибку в измерении координаты до  $0,3\%$ .

Испытания, проведенные при различных мощностях дозы, показали, что стандартное отклонение распределения отношения сигнала

ВПД к сигналу монитора обратно пропорционально корню квадратному из мощности дозы и что полуширина этого распределения падает примерно в 2 раза при подаче на ВПД напряжения смещения свыше 20 В. В этих условиях, учитывая экспериментально полученную крутизну заднего фронта кривой Брэгга, равную 2% от максимума на 1 мм  $H_2O$ , можно будет наводить максимум кривой Брэгга на опухоль с точностью около 1-2 мм.

Измерения кривой гетерогенности были проведены на водном фантоме, грубо имитирующем грудную клетку человека. На рис.7 представлено горизонтальное сечение фантома. Положение ВПД помечено крестиком. Область 1 заполнена водой, области 2 и 3 изготовлены из пенопласта с удельным весом  $0,3 \text{ г/см}^3$  и предназначены для имитации правого и левого легкого, область 4 изготовлена из фторопласта с удельным весом  $2,2 \text{ г/см}^3$  и имитирует позвоночник. На рис.8 представлена кривая гетерогенности, полученная для данного фантома. Кривые гетерогенности, снятые для противоположных направлений вращения фантома, отличаются на  $1 \div 2 \text{ мм}$ , что соответствует среднеквадратичной сумме их ошибок, определяемых точностью измерения мощности дозы и крутизной заднего фронта кривой Брэгга. Этот результат указывает на отсутствие влияния инерции механических узлов на точность определения кривой гетерогенности.

Для проверки точности отработки механическими узлами устройства "Мезон" кривой гетерогенности в режиме "воспроизведе-

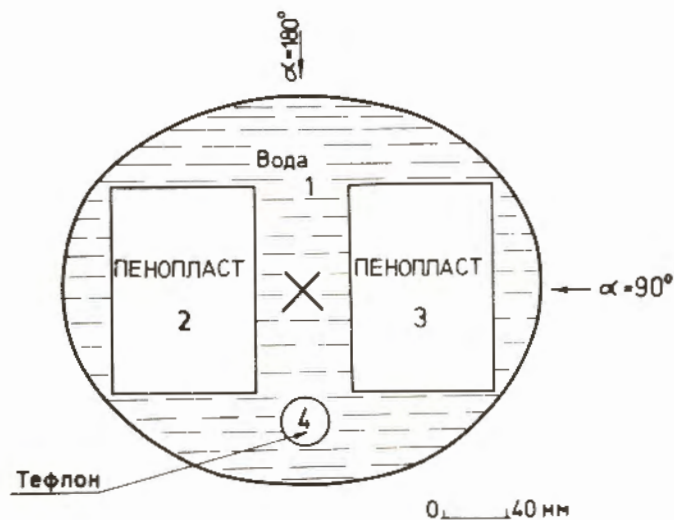


Рис.7. Схема фантома для имитации области грудной клетки человека. Пояснения в тексте.

Рис.8. Кривая гетерогенности, измеренная в режиме "запись" для фантома грудной клетки человека. По горизонтальной оси отложена величина, пропорциональная углу поворота РС, по вертикальной оси - толщина слоя воды /в единицах  $0,1 \text{ мм/ ППТ}$ .

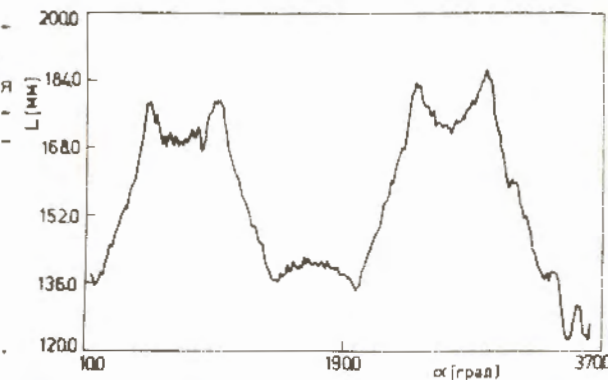
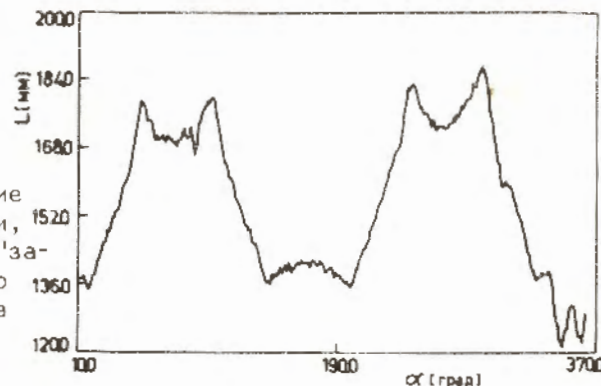


Рис.9. Воспроизведение кривой гетерогенности, полученной в режиме "запись". Обозначения по осям такие же, как на рис.8.



ние" в память ЭВМ была записана кривая в виде синусоиды с максимальными градиентами, соответствующими градиентам кривой гетерогенности для фантома. Эта кривая была отработана затем в режиме "воспроизведение". Средняя квадратичная разность между исходной синусоидной и отработанной кривой, равная ошибке воспроизведения кривой механическими узлами, составляет около  $0,5 \text{ мм}$ . Для проверки работы устройства "Мезон" в режиме "воспроизведение" непосредственно на протонном пучке была отработана кривая гетерогенности для фантома /рис.8/, ранее полученная в режиме "запись". На рис.9 показана кривая зависимости толщины переменного поглотителя от угла поворота кресла, полученная в режиме "воспроизведение". Эта кривая в пределах  $1 \div 2 \text{ мм}$  совпадает с кривой гетерогенности /см. рис.8/ для фантома, полученной в режиме "запись". На рис.10 показано распределение мощности дозы, измеренное при отработке кривой гетерогенности в режиме "воспроизведение". Среднеквадратичное отклонение мощности дозы этого распределения относительно среднего

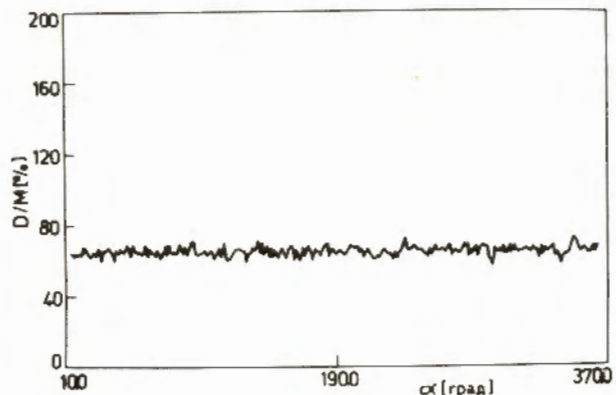


Рис. 10. Зависимость отношения сигналов ВПД и монитора от угла поворота фантома в режиме "воспроизведение".

значения / которое "удерживается" в центре вращения фантома и составляет 69% от максимума кривой Брэгга / равно  $\approx 2,5\%$ . Значение этой ошибки складывается из ошибки измерения мощности дозы в режиме "запись" /  $\approx 1,6\%$ , ошибки, определяемой точностью отработки механическими узлами кривой гетерогенности /  $\approx 1\%$ , и ошибки измерения мощности дозы во время режима "воспроизведение" /  $\approx 1,6\%$ . Их среднеквадратичная сумма приблизительно равна стандартному отклонению полученного распределения, что указывает на отсутствие влияния инерции механических узлов и других систематических факторов на точность наведения пика Брэгга при облучении мишени в режиме "воспроизведение". Так как последняя из перечисленных выше ошибок /  $1,6\%$  не влияет на точность режима "воспроизведение", то точность наведения пика Брэгга, соответствующая изменению на 2% мощности дозы на заднем фронте кривой Брэгга, составляет  $\approx 1,0$  мм  $H_2O$ , т.е. достигнутая чисто аппаратная точность оказывается существенно лучше, чем возможная в настоящее время точность фиксации пациента на протонном пучке, составляющая  $\pm 5-10$  мм.

## ВЫВОДЫ

Разработана, смонтирована и отлажена на линии с ЭВМ автоматическая установка "Мезон", позволяющая последовательно совмещать пик Брэгга с заданными точками мишени и надежно удерживать пик в этой зоне во время ротационного сканирующего облучения злокачественных опухолей пучком протонов высокой энергии.

В ходе проведенных испытаний установки "Мезон" составлены и отлажены программы для измерения ее технических параметров и для управления ею как в режиме удержания пика в заданных

точках мишени/режим "запись"/, так и в режиме "воспроизведение" параметров первого облучения во время серии повторных сеансов, а также для обработки данных, получаемых во время ротационного сканирующего облучения.

Измерения параметров установки "Мезон" показали, что они соответствуют медико-техническим требованиям, которые были выработаны исходя из опыта эксплуатации полуавтоматического прототипа этой установки "Протон" при облучении рака пищевода и легкого. Точность определения кривой гетерогенности в режиме "запись" при испытаниях установки "Мезон" на медицинском протонном пучке синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ составила  $\approx 0,8$  мм  $H_2O$  и точность наведения пика Брэгга на облучаемую мишень в режиме "воспроизведение" при испытаниях в таких же условиях составила  $\approx 1,0$  мм  $H_2O$ .

В заключение авторы выражают благодарность члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову и профессору А.И.Рудерману за содействие в проведении настоящей работы, Ю.К.Акимову, В.Г.Зинову, А.Н.Синаеву и сотрудникам отдела автоматизации физических экспериментов ОИЯИ за изготовление и помощь в наладке стандартных блоков электроники, а также Б.П.Осипенко за изготовление полупроводниковых детекторов для внутрисполостных датчиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Медицинский протонный пучок ЛЯП ОИЯИ. 11. Под редакцией В.П.Джелепова и А.И.Рудермана. ОИЯИ, 7287, Дубна, 1973.
2. Астрахан Б.В. и др. Труды Первого международного семинара "Использование протонных пучков в лучевой терапии". Москва, 6-11 декабря 1977 г., вып.2., Атомиздат, М., 1979, с.99.
3. Абазов В.М. и др. ОИЯИ, Д-8883, Дубна, 1975.
4. Протонные пучки высоких энергий и лучевая терапия злокачественных опухолей. Под редакцией В.П.Джелепова и А.И.Рудермана. ОИЯИ, 9035, Дубна, 1975.
5. Джелепов В.П. и др. ОИЯИ, Р16-11183, Дубна, 1978.
6. Астрахан Б.В., Пахомов В.И. Труды Первого международного семинара "Использование протонных пучков в лучевой терапии". Москва, 6-11 декабря 1977 г., вып.2, Атомиздат, М., 1979, с.92.
7. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-73332, Дубна, 1973.
8. Андерт К. и др. ОИЯИ, 13-7125, Дубна, 1973.
9. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-10576, Дубна, 1977.
10. Andert K. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-19, No3., 1972, p.404.

11. Борейко В.Ф. и др. ОИЯИ, 13-6396, Дубна, 1972.
12. Борейко В.Ф. и др. ОИЯИ, 13-12334, Дубна, 1979.
13. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-8754, Дубна, 1975.
14. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-9479, Дубна, 1976.
15. Журавлев Н.И. и др. ОИЯИ, 10-10576, Дубна, 1976.
16. Зорин В.П. и др. ОИЯИ, Р16-11080, Дубна, 1977.
17. Астрахан Б.В. Авторское свидетельство СССР № 405236 МКИ А61 № 5/10 от 03.05.67 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979 г. № 29, с.269.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 февраля 1980 года.