

СЗУУ.101

A-674

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



5639/2-78

25/11-78

P13 - 11872

Ю.С.Анисимов, Н.Н.Говорун, В.М.Головатюк,
Ю.В.Заневский, А.Б.Иванов, И.М.Иванченко,
В.А.Крамаренко, П.В.Мойсенз, Л.Моучка,
В.Д.Пешехонов, И.Н.Семенюшкин, А.Е.Сеннер,
Б.Ситар, И.А.Тяпкин, С.П.Черненко

РАДИОГРАФИЯ НА ПУЧКЕ ИОНОВ ГЕЛИЯ
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

1978

P13 - 11872

Ю.С.Анисимов, Н.Н.Говорун, В.М.Головатюк,
Ю.В.Заневский, А.Б.Иванов, И.М.Иванченко,
В.А.Крамаренко, П.В.Мойсенз, Л.Моучка,
В.Д.Пешехонов, И.Н.Семенюшкин, А.Е.Сеннер,
Б.Ситар, И.А.Тяпкин, С.П.Черненко

РАДИОГРАФИЯ НА ПУЧКЕ ИОНОВ ГЕЛИЯ
СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

*Доклад на III Сессии по использованию ядерно-
физических методов для решения научно-технических
и народно-хозяйственных задач /Дубна, 1978/*



Анисимов Ю.С. и др.

P13 - 11872

Радиография на пучке ионов гелия синхрофазотрона ОИЯИ

Описывается экспериментальная установка и приводятся предварительные результаты радиографических исследований на пучке ионов гелия синхрофазотрона ОИЯИ. Энергия альфа-частиц - 200 МэВ/нуклон. Показано, что метод обеспечивает разрешение по плотности около 0,1% при пространственном разрешении около 2 мм. Доза облучения тестовых объектов при этом составляла 1 мрад; статистика - около 100 событий на ячейку площадью 2×2 мм².

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Anisimov Yu.S. et al.

P13 - 11872

Radiographic Investigations on the Alpha Particle Beam of the Dubna Synchrophasotron

The experimental set-up for radiographic investigations on the alpha particle beam at the Dubna synchrophasotron is described. Preliminary results are presented. Alpha particles with the energy of 200 MeV/nucleon were used. The density resolution of 0.1 percent and space resolution of 2 mm has been viewed. The radiation dose on the test objects was less than 10 mrad. The results are presented for approx. 100 events per a 2×2 mm² cell.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие медицинской лучевой диагностики привело к появлению в настоящее время автоматизированных, работающих на линии с ЭВМ, рентгенодиагностических установок различных типов. Однако величина лучевой нагрузки, даже на современных системах типа ЕМІ-сканеров, составляет несколько рад за процедуру, что ограничивает применение подобных установок для профилактических целей. Особенности взаимодействия с веществом заряженных частиц - протонов, ионов в сравнении с рентгеновским излучением позволяют проводить радиографическое обследование при существенно меньших дозах облучения и дают большую информацию о тонкой анатомической структуре. Исследования по использованию заряженных частиц для радиографии были начаты в 1967 году^{/1/} и проводятся сейчас во многих физических центрах^{/2/}. Наличие низкоэнергетических выведенных пучков многозарядных ионов на синхрофазотроне ОИЯИ позволяет проводить исследования в этом направлении^{/3/}. В работе приводятся предварительные результаты радиографических исследований на пучке ионов гелия с энергией ~200 МэВ/нуклон.

1. ПРИНЦИП ПРОТОННО-ИОННОЙ РАДИОГРАФИИ

При прохождении заряженных частиц через вещество происходит постепенное уменьшение энергии из-за ионизационного торможения на атомах вещества. Величина

пробега определяется энергией частиц, при этом разброс пробега моноэнергетичных частиц в веществе /стрегглинг/ достаточно мал. Точное измерение остаточного пробега /определение точки остановки/ или остаточной энергии частиц, прошедших через исследуемый объект, дает информацию об интегральной плотности вещества по пути частиц. На рис. 1 показаны зависимости величины потока рентгеновских лучей и протонов от

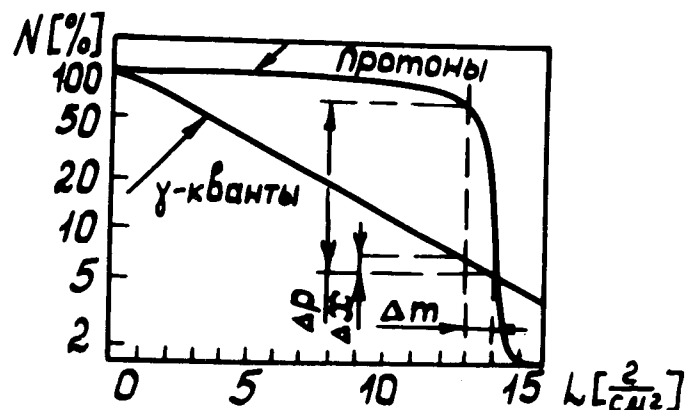


Рис. 1. Интенсивность пучка протонов и рентгеновских лучей в зависимости от толщины поглотителя. Энергия протонов - 137 МэВ. Значение пикового напряжения на рентгеновской трубке - 100 кВ.

толщины поглотителя^{4/}. В случае протонов наблюдается незначительное уменьшение потока из-за ядерных взаимодействий и резкий спад зависимости, соответствующий остановкам частиц. Изменение плотности вещества на величину Δm вызывает изменение потока рентгеновских лучей на величину ΔR , потока протонов - на величину ΔN . Отношение этих величин характеризует относительные возможности рентгеновской и протонно-ионной радиографии по контрастности изображения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения радиографических исследований на пучке ионов гелия с энергией ~200 МэВ/нуклон создана установка на основе многопроволочных пропорциональных камер /ПК/, работающих на линии с ЭВМ НР-2116В. Схема расположения аппаратуры показана на рис. 2.

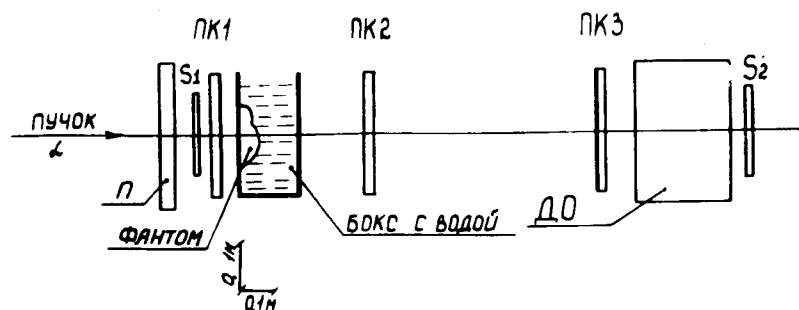


Рис. 2. Схема расположения экспериментальной аппаратуры на выведенном пучке ионов гелия.

В состав установки входят сцинтилляционные счетчики (S_1, S_2); двухкоординатные пропорциональные камеры /ПК1÷ПК3/; модуль из пропорциональных камер для определения точки остановки частиц - ДО /"детектор остановки"/; набор высокоточных пластин из оргстекла / $\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$ /, используемых в качестве поглотителя - П; а также бокс с водой для размещения исследуемого объекта с целью устранения эффекта геометрической формы.

2.1. Двухкоординатные пропорциональные камеры

Три пропорциональные камеры с чувствительной площадью $250 \times 250 \text{ мм}^2$ имеют межэлектродное расстояние 6 мм. Анодные плоскости намотаны золоченой вольфра-

мовой проволокой диаметром 0,02 мм с шагом 2 мм. Катодные плоскости намотаны ортогонально проволокой из бериллиевой бронзы диаметром 0,1 мм с шагом 2 мм. Координатная информация снимается с катодов ПК через электромагнитные линии задержки^{/5/}. Анодные сигналы задают нулевой момент времени при определении X- и Y-координат по задержке катодных сигналов соответствующей камеры, а также используются для организации триггера. Временное разрешение ПК - около 2,5 мкс, камеры работают на газовой смеси $\text{Ag} + 25\% \text{CO}_2 + 3\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ при напряжении -4,1 кВ.

2.2. Детектор остановки

Детектор остановки представляет собой блок из 12 пропорциональных камер, размещенных в едином газовом объеме. Схематичное изображение детектора представлено на рис. 3. Анодные плоскости каждой камеры

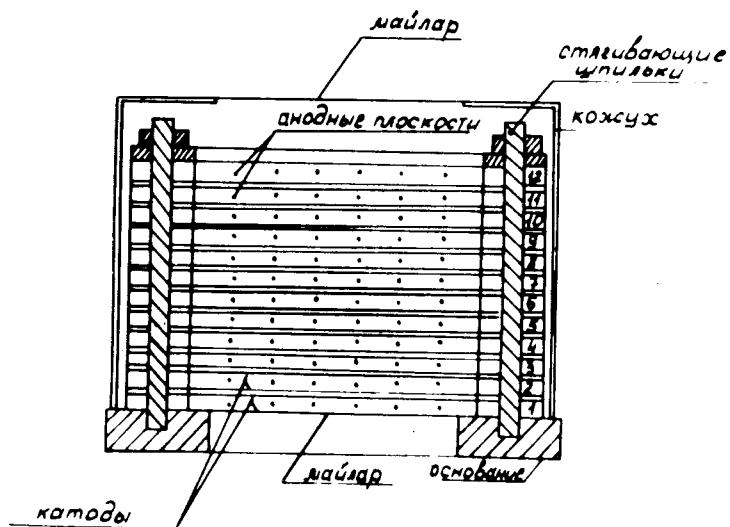


Рис. 3. Схематическое изображение детектора, служащего для определения точки остановки альфа-частиц.

намотаны золоченой вольфрамовой проволокой диаметром 0,02 мм с шагом 4 мм, проволоки распаяны на общие шины, с которых снимается информация. Катоды выполнены из алюминиевой фольги толщиной 175 мкм. Межэлектродное расстояние - 6 мм, расстояние между катодами соседних камер - 4 мм. Детектор работает на газовой смеси $\text{Ag} + 15\% \text{CO}_2 + 3\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ при напряжении -2,3 кВ. Чувствительная площадь детектора - $280 \times 280 \text{ мм}^2$. Таким образом, ДО представляет собой систему из 12 независимых газовых счетчиков /каналов/ с размещенными между ними поглотителями толщиной 0,095 г/см², роль которых выполняют алюминиевые катоды.

2.3. Электронная аппаратура

На рис. 4 приведена функциональная схема электронной аппаратуры, в состав которой входят:

- электроника съема информации с ПК /9 каналов усилителей и дискриминаторов типа Д-201^{/6/} и ДО /12 каналов усиления сигналов/;
- блоки, осуществляющие отбор событий по заданным критериям - типа ЛТ-203 и типа ЛТ-206;
- блоки регистрации информации с ДО /годоскопический регистр типа R-206 / и ПК /время-цифровые конверторы типа R-302 с тактовой частотой 125 МГц/;
- набор блоков стандартной быстрой электроники^{/7/};
- электроника визуализации, включающая интерфейс к запоминающему устройству РЕР-500^{/8/}, драйвер черно-белого и цветного ТВ-монитора.

Связь с ЭВМ HP-2116B осуществлялась через драйвер типа ДНР-821^{/9/} с использованием контроллера С-004, управление прерыванием ЭВМ проводилось с помощью специализированного блока. Электроника выполнена в стандарте КАМАК.

Отбирались события, отвечающие логике $(S_1 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot C_1 \cdot \bar{C}_{12} \cdot \bar{S}_2)$, где A_i - анодные сигналы i -й ПК, а C_1 и C_{12} - соответственно первый и последний каналы ДО. Кроме того, требовалось выполнение усло-

вия - один и только один анодный и катодный сигнал за время памяти ПК.

Аппаратура позволяла передавать в ЭВМ до 1000 полезных событий за время вывода пучка, равное ~250 мс.

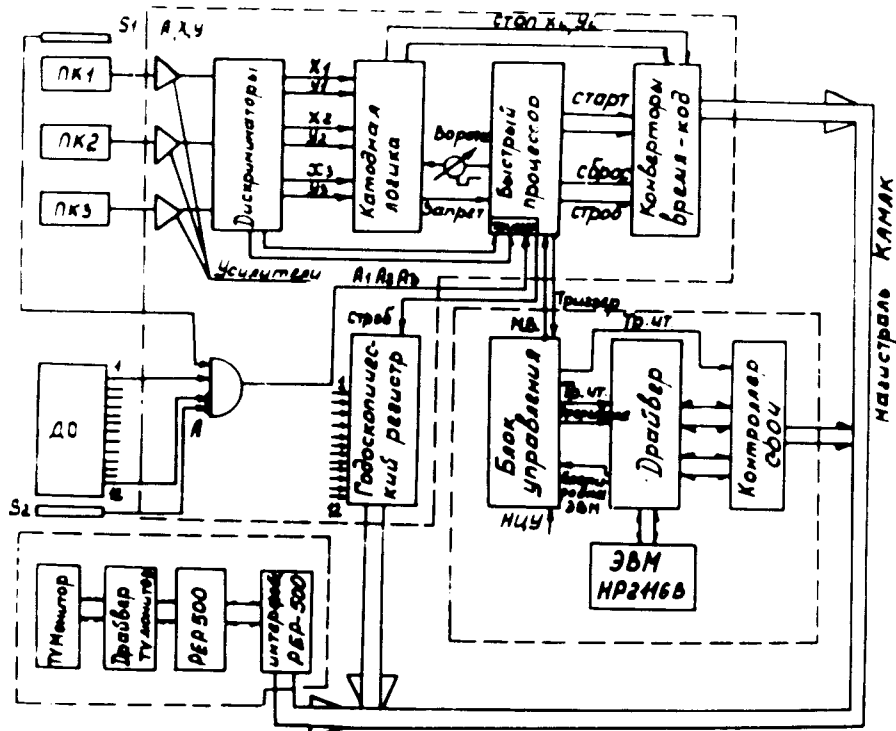


Рис. 4. Функциональная схема электронной аппаратуры.

2.4. Обработка информации.

При помощи созданного комплекса программ обработка данных осуществлялась в режиме "on-line" с целью получения основных характеристик и оптимизации режима работы. По характеру результатов обработки

совокупность программ подразделялась на два класса: к первому относятся программы, обеспечивающие контроль работы аппаратуры, ко второму - программы статистической обработки координатного уровня, обеспечивающие получение экспериментатором информации о наличии неоднородностей по плотности в исследуемом объекте. При этом объект "проецируется" на плоскость, ортогональную оси пучка, и исследуемая площадь разделяется на элементарные ячейки, количество которых - 100x100. Анализируются статистически нормированные распределения точек остановки частиц в ДО по каждой элементарной ячейке. Результаты обработки по программам первого и некоторой части второго класса представляются экспериментатору с помощью дисплея и АЦПУ. Окончательная радиографическая информация об исследуемом объекте выводится на ТВ-монитор.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Параметры пучка ионов гелия

На рис. 5 показана зависимость ослабления потока пучковых частиц от количества пройденного ими веществ-

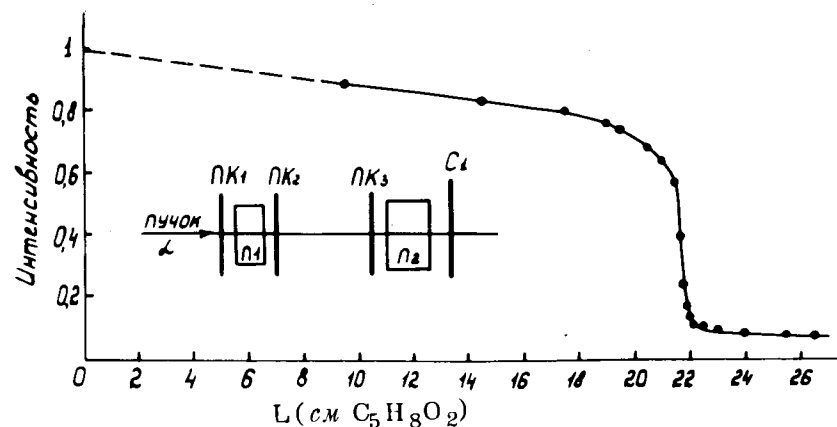


Рис. 5. Интенсивность потока частиц пучка в зависимости от толщины поглотителя.

ва. Величина пробега составляет примерно $25,9 \text{ г/см}^2$ тканезквивалентного вещества, что соответствует энергии альфа-частиц $\sim 200 \text{ МэВ/нуклон}$. Схема измерений представлена на том же рисунке. Между ПК1 и ПК2 находилось вещество П1, поглотитель переменной толщины П2 размещался между ПК3 и ДО. S_1 - первый счетчик детектора остановки. Определялось отношение счета S_1 к монитору ($A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$), где A_i - анодные сигналы соответствующей ПК.

Пучок имел следующие размеры: по горизонтали - около 8 см, по вертикали - около 12 см. Собственная угловая расходимость пучка меньше 10 мрад .

При проведении радиографических исследований в триггер дополнительно были включены S_2 и S_{12} , работающие в режиме антисовпадений. Это позволило исключить небольшую долю частиц с длинным пробегом, присутствующих в пучке.

3.2. Чувствительность установки

Чувствительность к изменению плотности определяется т.н. глубинным разрешением и зависит от стрегглинга, энергетического разброса пучка, аппаратных погрешностей, влияния многократного рассеяния на измеряемую величину пробега. Однако последние два фактора в нашем случае пренебрежимо малы. На рис. 6 приведены кривые поглощения альфа-частиц в области их остановки, полученные для различных каналов ДО. Зависимости характеризуют высокую однородность счетчиков детектора остановки.

Гистограмма статистического распределения точек остановки по каналам ДО в случае тканезквивалентного гомогенного поглотителя толщиной $25,54 \text{ г/см}^2$ показана на рис. 7. Ширина распределения на полувысоте - около 4,5 канала, что соответствует величине $\sigma = 1,9$ канала. Путем определения центра тяжести подобных распределений для различной толщины поглотителя из оргстекла была проведена калибровка ДО. Результаты представлены на рис. 8. Цена канала детектора оста-

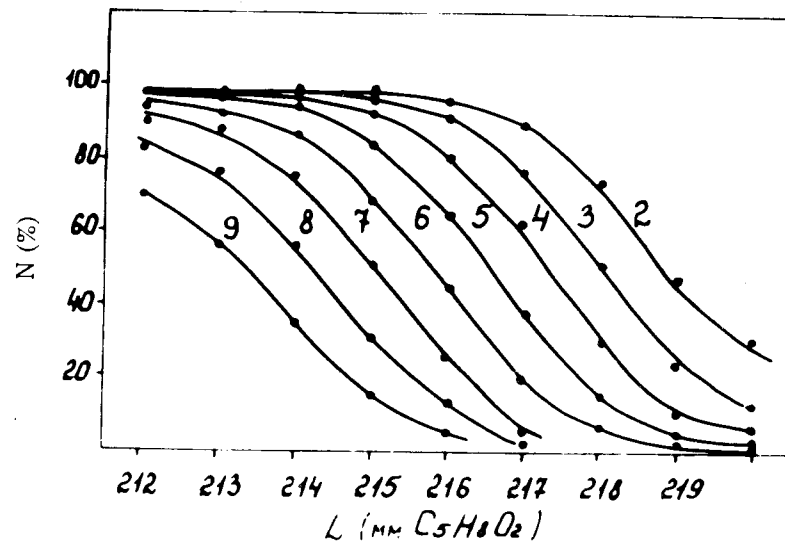


Рис. 6. Области резкого спада кривых поглощения альфа-частиц в зависимости от количества вещества /для различных каналов ДО/.

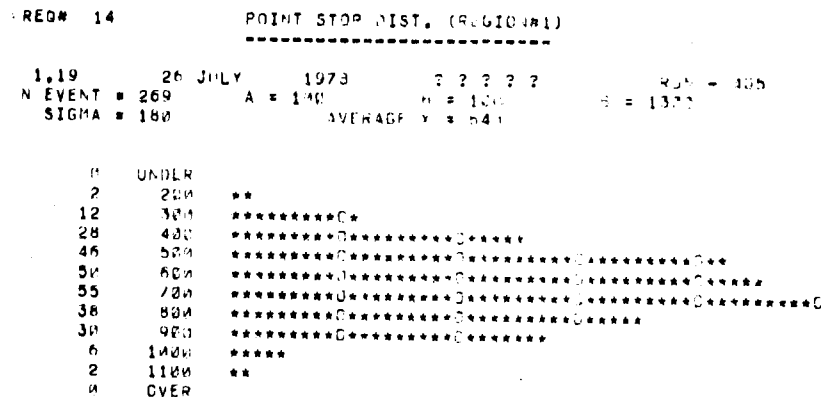


Рис. 7. Статистическое распределение точек остановки по каналам ДО для гомогенного поглотителя.

новки соответствует $0,082 \text{ г/см}^2$ тканезквивалентного вещества. Следовательно, для распределения, приведенного на рис. 7, $\sigma = 0,155 \text{ г/см}^2$.

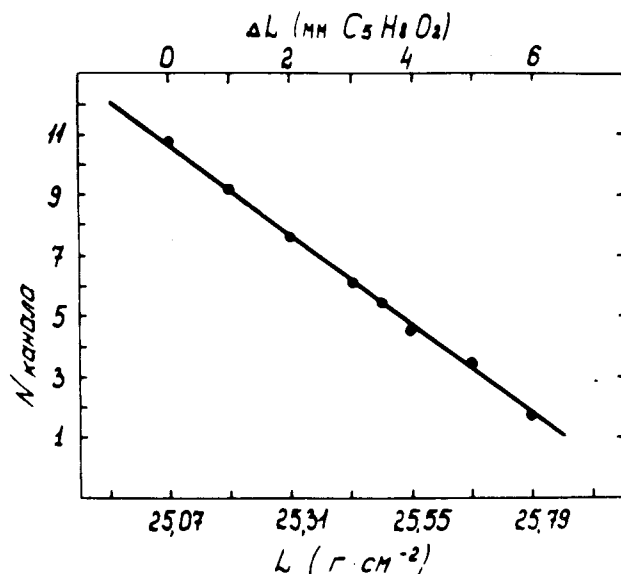


Рис. 8. Калибровочная зависимость, характеризующая чувствительность ДО для тканезквивалентного вещества.

Стрегглинг определяется выражением $\epsilon = \frac{\sigma_{\text{стр.}}}{R}$,

где $\sigma_{\text{стр.}}$ - среднеквадратическая ошибка распределения точек останова частиц, а R - величина их пробега в веществе. Для альфа-частиц $\epsilon = 0,5\% / 10$. Измеряемая величина σ определяется стрегглингом, импульсным разбросом пучка и погрешностью аппаратуры:

$$\sigma^2 = (\sigma_{\Delta p/p})^2 + (\sigma_{\text{стр.}})^2 + (\sigma_{\text{аппар.}})^2.$$

Считая $\sigma_{\text{аппар.}}$ пренебрежимо малой величиной, получаем, что $\sigma_{\Delta p/p} = 0,33\%$.

Для увеличения чувствительности до величины $\pm \omega$, необходимо иметь статистическую обеспеченность N частиц на ячейку, где $\omega = \sigma \cdot N^{-1/2}$. Установка дает возможность определять изменения плотности в объекте на $0,024 \text{ г/см}^2 / 0,2 \text{ мм оргстекла/}$ при $N > 42$.

Пространственное разрешение метода определяется координатной точностью детекторов и многократным рассеянием.

3.3. Радиография фантомов

Для получения изображения объектов использовались фантомы из оргстекла переменного сечения с набором отверстий различного диаметра. Фантомы устанавливались в воздухе непосредственно перед боксом с водой или помещались в воду. При размещении фантома толщиной l / см / в боксе изменение плотности соответствовало величине $\Delta \rho = 0,18 l$ / г/см² /. Информация записывалась на магнитную ленту для последующего анализа, а также обрабатывалась в режиме "on-line". Результаты представлялись на цветном ТВ-мониторе.

На рис. 9 приведена радиограмма /снимок с экрана телевизора/ фантома из оргстекла, помещенного в бокс с водой, там же показаны геометрические размеры фантома. Изменения плотности соответствуют $\sim 0,05 \text{ г/см}^2$ и $\sim 0,1 \text{ г/см}^2$. Видны отверстия диаметром 2,4,6 и 8 мм.

Получено изображение фантома из оргстекла, помещенного перед боксом с водой, с перепадом в толщине на $0,2 \text{ мм}$, что соответствует величине $\Delta \rho = 0,024 \text{ г/см}^2$. Радиограмма показана на рис. 10. Статистическая обеспеченность - 100 событий на ячейку размером $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Поглощенная доза при этом составила величину около 1 мрад .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная установка, работающая на пучке ионов гелия с энергией $\sim 200 \text{ МэВ/нуклон}$, обеспечивает:

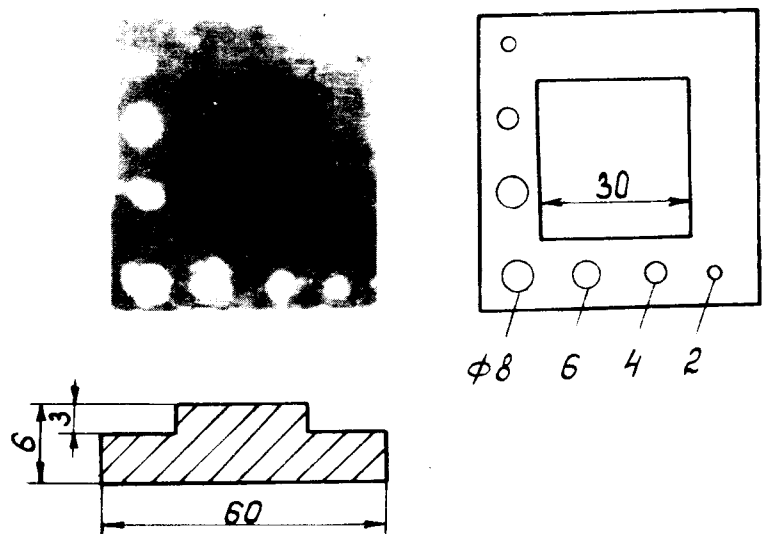


Рис. 9. Радиогамма /снимок с экрана телевизора/ и эскиз фантома из оргстекла.

- высокое разрешение по плотности / $< 0,1\%$ / с относительно хорошим пространственным разрешением / ~ 2 мм/, поглощенная доза при этом порядка 1 мрад;
- представление информации об исследуемом объекте на цветном ТВ-мониторе.

Авторы выражают благодарность А.М.Балдину за помощь и постоянный интерес к работе, М.Г.Мещерякову - за содействие работе.

Авторы признательны И.Б.Иссинскому, А.Д.Кириллову и С.А.Новикову - создателям канала медицинского пучка, без которого невозможным было бы проведение данной работы. Большая помощь в подготовке и проведении эксперимента была оказана М.Н.Хачатуряном, которому авторы выражают глубокую признательность. Авторы благодарят также С.А.Аверичева, Б.К.Курятникова, И.Ф.Колпакова, С.Г.Басиладзе, М.Н.Михайлову,

В.А.Смирнова, Л.Ситарову, Р.М.Базлову, В.А.Белякова, А.Е.Московского, Н.П.Волкова, Ю.Г.Федулова, Н.Н.Тиханчева, В.К.Юдина, В.И.Шарова за помощь в работе, а также Н.Н.Карпенко - за полезные обсуждения.

Авторы признательны А.И.Рудерману и Г.В.Макаровой за полезные обсуждения и интерес к работе.

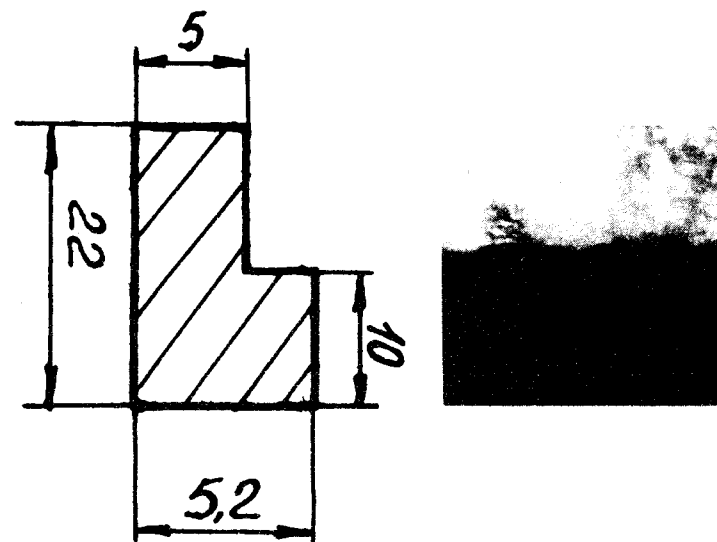


Рис. 10. Радиогамма, иллюстрирующая возможность обнаружения неоднородностей по плотности на $0,1\%$. Снимок с экрана телевизора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tobias S.A. e.a. LBL Report No. UCRL-17357, 1967.
2. Заневский Ю.В. и др. ОИЯИ, 14-11330, Дубна, 1978.
3. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 9-11765, Дубна, 1978.
4. Steward V.W., Koehler A.M. Nature, 1973, v.245, p.38.
5. Заневский Ю.В. и др. ОИЯИ, P14-10410, Дубна, 1977.

6. Анисимов Ю.С. и др. ОИЯИ, 18-11346, Дубна, 1978.
7. Базиладзе С.Г. и др. ОИЯИ, 13-6383, Дубна, 1972.
8. PEP-500, Lithocon State Image Memory/Scan Converter, Princeton Electronic Products, Inc., 1976.
9. Никитюк Н.М. и др. ОИЯИ, P10-7914, Дубна, 1974.
10. Sternheimer R.M. Phys.Rev., 1960, v.117, 2, p.485.

*Рукопись поступила в издательский отдел
5 сентября 1978 года.*