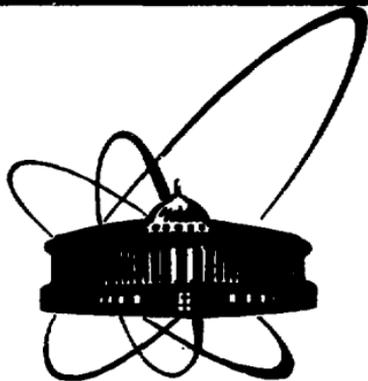


8U8011405 ✓



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P10-80-94

**Ю. В. Заневский, Э. М. Иванченко, И. М. Излученко,  
П. В. Мойсенз, В. Д. Пешехочов, А. Е. Сеннер**

**МОДЕЛИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА  
ДЛЯ ИОННОЙ РАДИОГРАФИИ**

**1980**

Заневский Ю.В. и др.

PIO-80-94

**Моделирующая программа для ионной радиографии**

Описывается моделирование с помощью ЭВМ процесса прохождения пучка моноэнергетических альфа-частиц через набор однородных сред. Этот процесс является определяющим при проведении экспериментальных исследований в области ионной радиографии. Приведены алгоритмы и результаты моделирования для некоторых конфигураций экспериментальной установки. Данные, полученные при моделировании реальной установки, хорошо согласуются с результатами работы с эталонным фантомом.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Zanevsky Yu.V. et al.

PIO-80-94

**Simulating Program for Ion Radiography**

Simulating by means of computer of the process of passage of the monoenergetic alpha-particle beam through a nonhomogeneous matter consisting of homogeneous media is described. This process is decisive at the performance of experimental investigations in the field of ion radiography. Algorithms and simulation results for some configurations of experimental setup are given. The results obtained at simulating of the existing setup agree well with those obtained when working with a reference phantom.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1980

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Заряженные частицы - протоны, ионы - в сравнении с рентгеновским излучением позволяют проводить радиографическое обследование биообъектов при существенно меньших дозах облучения. При этом результаты анализа тонкой анатомической структуры более информативны. Исследования в этом направлении проводятся в настоящее время во многих физических центрах, располагающих низкоэнергетическими выведенными пучками многозарядных ионов<sup>/1/</sup>.

При прохождении заряженной частицы через вещество происходит постепенное уменьшение энергии из-за ионизационного торможения на атомах вещества. Точное измерение остаточного пробега /определение точки остановки/ или остаточной энергии дает информацию об интегральной плотности вещества по пути частицы. Величина остаточного пробега /энергии/ моноэнергетических частиц имеет статистические флуктуации - так называемый страгглинг /энергетический страгглинг/. Наличие страгглинга обуславливает определенные требования к экспериментальной установке для достижения чувствительности, присущей методу. Целью данной работы явилось создание моделирующей программы и проведение с ее помощью оптимизации системы обработки информации и экспериментальной установки для радиографии на пучке альфа-частиц. Требования к моделирующей программе были следующими: универсальность по отношению к материалам, из которых подготовлены модули установки, возможность варьировать количество вещества на пути пучка; гибкость; простота использования; высокая скорость счета; рациональное использование запоминающих устройств.

## 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Сущность моделируемого процесса заключается в следующем. Пучок моноэнергетических альфа-частиц проходит через набор однородных сред, заканчивающийся детектором остановки<sup>/2/</sup>. Схема экспериментальной установки, представленная в виде набора сред, показана на *рис.1*.

Под средней длиной пробега понимается величина

$$\bar{R} \approx \int_0^{\infty} x W(E, x) dx, \quad /1/$$

где  $W(E, X)$  представляет собой распределение длины пробега.

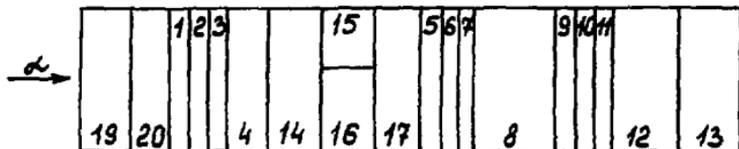


Рис.1. Схема экспериментальной установки для ионной радиографии, представленная в виде набора однородных сред. 1,3,5,7,9,11 - медь, 2,6,10 - вольфрам, 4,8, 12,18,20 - воздух, 14,15,19 - оргстекло, 13 - алюминий, 16- оргстекло или воздух, 17 - вода.

Заряженные частицы, проходя через вещество, теряют энергию благодаря:

- 1/ потерям на ионизацию и возбуждение электронных оболочек атомов среды;
- 2/ поляризации атомов;
- 3/ радиационным потерям;
- 4/ ядерному торможению и перезарядке.

При кинетической энергии до 1 ГэВ потери энергии определяются главным образом первым процессом. Величина ионизационных потерь  $dE/dX$  частиц с кинетической энергией более 1 МэВ определяется по формуле Бете. Таким образом, для частиц с начальной энергией  $E_0$  средняя величина пробега определяется как

$$\bar{R} = \int_0^{E_0} \left( - \frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE. \quad /2/$$

Как было уже сказано, статистические флуктуации в потерях энергии заряженных частиц приводят к разбросам длин пробегов, распределение которых можно считать гауссовым<sup>/3/</sup>. Обозначим через  $\sigma$  стандартное отклонение длин пробегов. Величина  $\sigma/\bar{R}$  слабо зависит от  $Z$  среды и для протонов с энергиями  $8 \div 500$  МэВ принимает значения в пределах  $1,9 \div 1,1\%$  /в воздухе/. Величина  $\sigma/\bar{R}$  для частиц с массой  $M$  может быть представлена<sup>/4/</sup> в виде

$$\frac{\sigma}{\bar{R}} = \sqrt{\frac{200 m_e}{M}} \cdot f(E/MC^2), \quad /3/$$

где  $m_e$  - масса электрона. Таким образом, для частиц с начальной энергией  $E_0$ , движущихся в однородных средах, можно моделировать точку остановки, используя выражения /2/ и /3/. Для повышения скорости счета используются значения величин  $\bar{R}(E_0)$  из работ<sup>/3,5/</sup>. Моделирование процесса прохождения частиц через вещество осуществляется с учетом индивидуальных характеристик

сред и исходных геометрических и кинематических параметров события. Зная значение исходной энергии пучка частиц, по зависимости  $\bar{R}(E)$  для конкретной среды находим величину средней энергии частиц на выходе из среды и, используя результаты работы<sup>16/</sup>, определяем значение  $\sigma_E$ . В работе<sup>16/</sup> дается значение энергетического страгглинга нерелятивистских частиц при энергетических потерях, доходящих до 80% /в отдельных случаях и выше/ от исходной кинетической энергии  $E_0$ . Вычисления справедливы для значений  $E_0$ , достигающих 30% от энергии массы покоя частиц, и не зависят от вида материала поглотителя. В нашем случае кинетическая энергия альфа-частиц - около 800 МэВ, что составляет ~21% от величины энергии покоя. На рис.2 показаны зависимости величин  $\sigma_E^2$  от средних энергетических потерь для альфа-частиц, заимствованные из работы<sup>16/</sup>.

По оси ординат отложены значения  $\frac{\sigma_E^2}{E_0(E_0-E)} \cdot \log U_0 \frac{\epsilon_p}{\epsilon}$ , где  $\epsilon = \frac{4m_e}{M} (I + \frac{m_e}{M})^{-2}$ ,  $M$  - масса частицы,  $\epsilon_p$  - значение  $\epsilon$  для протонов,  $U_0 = \epsilon E_0 / I$ ,  $I$  - потенциал ионизации.

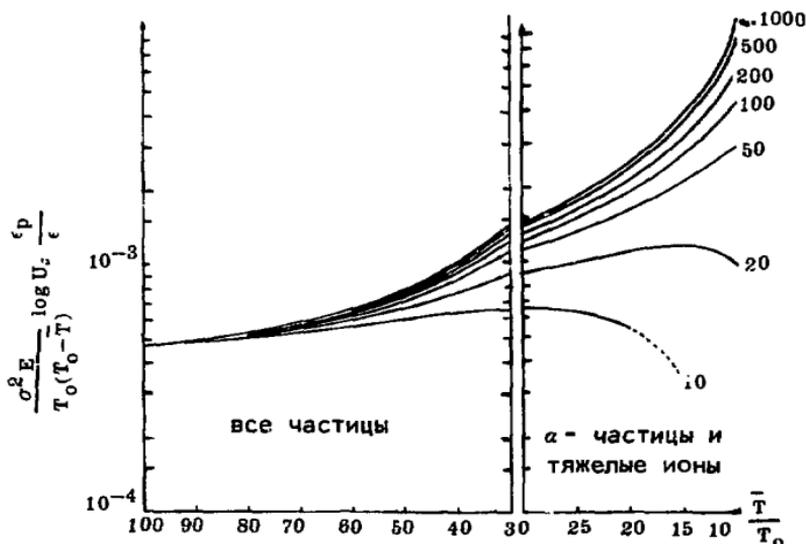


Рис.2. Зависимость  $\delta^2 E$  от величины средних потерь энергии.

Полученные параметры  $E$ ,  $\sigma_E$  используются для определения значения энергии на выходе из среды в предположении гауссово-

го характера распределения потерь энергии. Указанная выше процедура производится последовательно для всех сред, находящихся до детектора остановки. С использованием рассчитанного значения энергии на выходе ДО моделируется z-координата точки остановки. В табл. 1 приведены параметры некоторых материалов, используемые при расчетах.

Таблица 1

Вещество	I /эВ/	$\rho$ /г/см <sup>3</sup> /	L /см
H	18,7	-	-
C	78	-	-
O	101	-	-
Al	163	2,70	8,9
Fe	273	7,87	1,76
Cu	314	8,96	1,43
W	-	19,3	0,35
H <sub>2</sub> O	72,08*	1,0	36,1
Оргстекло	68,15*	1,18	34,5
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>			
Воздух	85*	1,205x10 <sup>-3</sup>	30050

### 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Моделирующая программа создана для установки<sup>1/2/</sup> по проведению радиографических исследований на пучке ионов гелия с энергией около 200 МэВ/нуклон. Установка содержит сцинтилляционные счетчики; двухкоординатные пропорциональные камеры /ПК1 ÷ ÷ ПК3/; модуль из пропорциональных камер для определения точки остановки частиц - детектор остановки /ДО/; набор пластин из оргстекла, используемых в качестве поглотителя; бокс с водой для размещения исследуемого объекта. Катоды ПК1÷ПК3 намотаны медной проволокой диаметром 0,1 мм с шагом 2 мм, аноды всех камер - золоченой вольфрамовой проволокой диаметром 0,02 мм

\* Значение потенциала ионизации определялось по формуле  $\ln I = \sum f_i \ln T_i$ , где  $f_i = n_i Z_i / \sum n_i Z_i$  /  $n_i$  - число атомов в 1 см<sup>3</sup> каждого из элементов/.

Таблица 2

Ключевое слово	Содержание
SENE	- исходная кинетическая энергия частиц $E_0$ .
TABN	- Z - координаты фантома и Y - координата изменения плотности.
STDT	- толщина канала Д0.
VENG	- величина стандартного отклонения значений $E_0$ /по нормальному закону распределения/.
VEVE	- максимальное отклонение значений энергии от величины $E_0$ /значения распределены равномерно/.
EXRG	- координаты излучаемой области фантома.
XYVR	- величина стандартного отклонения $R_X(y) = [X(y)ЛГ - X(y)ПКЗ]$ , где ЛГ - координаты частиц на левой границе экспериментального объема, ПКЗ - координаты в плоскости ПКЗ.
ELMN	- X(y) - размер элементарной ячейки.
STMN	- нижняя граница статобеспеченности для элементарной ячейки.
IERN	- +число каналов от наиболее вероятного канала Д0 при режиме обработки FGАU.
FAVR	- указатель обработки информации по методу "среднего".
FMPF	- указатель вычисления модуляционной передаточной функции.
FGAU	- указатель обработки информации по методу "Гаусс".
FMNK	- указатель для вычисления X, Y-координат трека в плоскости фантома, если FMNK=0, за эти значения принимаются координаты по ПК1; если FMNK=1, эти значения определяются по информации с ПК1÷ПКЗ методом наименьших квадратов.
ABSO	- Z - координаты поглотителя.
WATR	- Z - координаты бокса с водой.
PION	- значения потенциала ионизации для сред.
PLTN	- значения плотности для сред.
PINT	- Z - координата левой границы экспериментального объема.
IPNT	- указатель массивов длин пробегов для сред /соответствующие значения энергий хранятся в массиве/.
LMOA, RMOA	- Z - коэффициенты левой и правой стенок бокса с водой соответственно.

с шагом 2 мм. Д0 - представляет собой систему из 12 независимых газовых счетчиков /каналов/ с размещенными между ними поглотителями, роль которых выполняют алюминиевые катоды толщиной 175 мкм.

В моделирующей программе ПК рассматривается как набор трех сред (Cu, W, Si), а Д0 - как поглотитель из Al.

Моделирующая программа создана на основе пакета GEANT<sup>7/</sup>. В состав программы включен пакет подпрограмм статистической обработки. Управляющие карты читаются в соответствии с требованиями программы FFREAD<sup>8/</sup>. В табл.2 даны функциональные значения некоторых используемых управляющих карт. Для определения величины страгглинга, характеризующего чувствительность метода, изучаемая область фантома /имитирующего заданную неоднородность по плотности/ разбивается на элементарные ячейки. Анализируются статистически нормированные распределения точек остановки частиц в Д0 по каждой ячейке. Результаты выводятся на АЦПУ в виде диаграмм рассеяния. Координаты точки остановки /средней величины пробега/ определяются двумя методами. По

первому методу  $\bar{R}$  находится как  $\bar{R} = \sum_{i=1}^N iP(i)$ , где N - число каналов в Д0, P(i) - вероятность остановки частицы в i-том канале. Во втором методе  $\bar{R}$  вычисляется по результатам фитирования распределения точек гауссовой кривой.

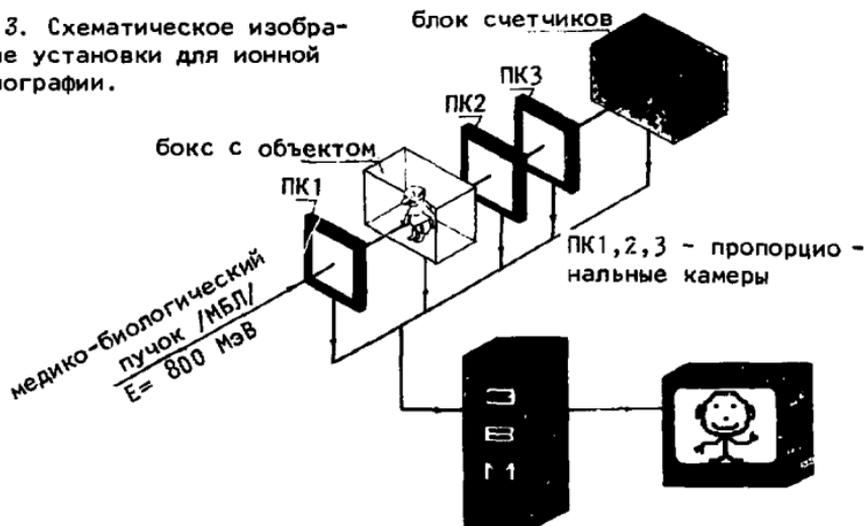
Имеется возможность получения характеристик пространственного разрешения системы, соответствующих определенному перепаду плотности и так называемой величины "нерезкости" по теңевому методу<sup>9/</sup>.

Гистограммирование, обработка и представление информации производятся с помощью пакета программ HBOOK<sup>10/</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная программа использовалась для моделирования работы установки /рис.3/, в состав которой входят 3 двухкоординатных ПК, бокс с водой, служащий для размещения биообъектов, детектор остановки, представляющий собой набор независимых каналов (Al) толщиной 0,035 см. Угловая расходимость пучка альфа-частиц принималась равной не более 2 мрад. Предполагалось прохождение моноэнергетичного пучка альфа-частиц через три ПК и слой воды. При толщине слоя воды 15,2 см и кинетической энергии альфа-частиц (E) - 620 МэВ средняя точка остановки частиц равна 5,6 канала Д0, а величина страгглинга ( $\sigma_{стр}$ ) - 1,3 в единицах канала Д0. При увеличении слоя воды до 20 см и E до 750 МэВ средняя точка остановки будет находиться в 4,9 канале Д0 и  $\sigma_{стр} = 1,9$  канала Д0.

Рис. 3. Схематическое изображение установки для ионной радиографии.



Проводилось моделирование работы реальной установки для радиографических исследований<sup>1,2</sup>. Учитывалось, что в этом случае существует дополнительно некоторое количество оргстекла в виде стенок бокса с водой /суммарная толщина ~ 2,8 см/. Кроме того, использовался набор пластин оргстекла различной толщины для смещения средней точки остановки частиц в область центральных каналов ДО. В предположении, что все количество оргстекла /поглотитель толщиной 7,3 см/ находится перед ПК1, а энергия альфа-частиц составляет 800 МэВ, определены средняя точка остановки частиц, равная 5,3 канала ДО, и  $\sigma_{стр.} = 1,63$  канала ДО. Отсюда остаточная величина пробега альфа-частиц в ДО составляет ~ 0,185 см и  $\sigma_{стр.} = 0,057$  см А1.

Результаты моделирования хорошо соответствуют результатам, полученным при работе реальной установки с эталонным фантомом.

В заключение авторы пользуются случаем выразить благодарность члену-корреспонденту АН СССР М.Г.Мещерякову, члену-корреспонденту АН СССР Н.Н.Говоруну за поддержку и интерес к работе. Авторы благодарны И.Н.Семенюшкину за оказанную помощь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заневский Ю.В. и др. ОИЯИ, 14-11330, Дубна, 1977.
2. Анисимов Ю.С. и др. ОИЯИ, P13-18872, Дубна, 1978.

3. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. "Наукова думка", Киев, 1975.
4. Symon K.R. Harvard University, Thesis, 1948.
5. Atkinson J.H. Jr., Willis B.H. High-Energy Particle Data, v.11, "CRL-2426, 1957.
6. Tschalar C. Nucl.Instr. &Meth., 1968, 61, p.141.
7. Brun R. et al. GEANT User Guide and Reference Manual. CERN-DD/78/2.
8. Brun R. et al. FFREAD User Guide. CERN-DD/EE/78-2.
9. Заневский Ю.В. и др. ПТЭ, 1978, 2, с.7.
10. Brun R., Ivanchenko I., Palazzi P. HBOOK Histogramming Fitting and Data Presentation Package. CERN-DD/77/9.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 февраля 1980 года.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Заказ 27804. Тираж 495. Уч.-изд. листов 0,74.  
Редактор Н.Н.Зрелова.  
Набор В.С.Румянцевой, Н.И.Коротковой.  
Макет Р.Д.Фоминой. Подписано к печати 14.03.80 г.