

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.К. Кулешов, Ю.И. Сертаков, П.В. Ефимов

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО РАДИАЦИОННОМУ КОНТРОЛЮ
И ДИАГНОСТИКЕ**

*Рекомендовано к печати в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 539.1.074(076.5)

ББК 22.344я73

К90

Кулешов В.К.

К90 Лабораторный практикум по радиационному контролю и диагностике: учебное пособие / В.К. Кулешов Ю.И. Сертаков, П.В. Ефимов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 360 с.

Пособие содержит описания лабораторных работ по темам: взаимодействие ионизирующих излучений с веществом, источники и детекторы ионизирующих излучений, общие методы радиационного контроля, спектрометрия ионизирующих излучений, радиография, радиационная безопасность и дозиметрические приборы, обработка результатов измерений.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Неразрушающий контроль» и предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» направления 551523 «Приборостроение»; по специальности 220501 «Управление качеством» направления 220500 «Управление качеством», а также для переподготовки и повышения квалификации специалистов в области неразрушающего контроля.

УДК 539.1.074(076.5)

ББК 22.344я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор
заведующий лабораторией НИИ интроскопии

Б.И. Капанов

Кандидат технических наук
заведующий отделом НИИ интроскопии

А.К. Темник

© ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2009

© Кулешов В.К., Сертаков Ю.И.,
Ефимов П.В., 2009

© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Лабораторный практикум по радиационному контролю и диагностике» содержит описания основных лабораторных работ, предназначенных для практического ознакомления студентов с понятиями, параметрами, экспериментальными методами и техническими устройствами радиационного контроля и диагностики.

Практикум состоит из лабораторных работ по следующим разделам:

- взаимодействие ионизирующих излучений с веществом;
- источники ионизирующих излучений;
- детекторы ионизирующих излучений;
- спектрометрия ионизирующих излучений;
- общие методы радиационного контроля;
- радиография;
- радиационная безопасность и дозиметрические приборы;
- обработка результатов измерений методами вычислительной математики.

В лабораторных работах используется, помимо стандартной радиационной техники, уникальное современное оборудование, например, рентгеновский аппарат РАП 160-5, созданный в ООО «Фотон» г. Томск, малогабаритный бетатрон, интроскоп с малодозовым газоразрядным люминесцентным преобразователем разработки НИИ интроскопии.

Особое внимание уделено практическому изучению рентгеновских аппаратов, распространенных в практике неразрушающего радиационного контроля – «МИРА-2Д», «АРИНА-02», «РАП 160-5», изучению работы бетатрона и исследованию параметров пучка излучения бетатрона.

Лабораторные работы по изучению детекторов ионизирующего излучения включают измерение характеристик сцинтилляционного детектора, счетчиков Гейгера–Мюллера, ионизационной камеры; определение чувствительности и коэффициента использования газонаполненных счетчиков; практическое изучение детекторов, применяемых в дозиметрии. Приводится практическое исследование параметров интроскопа с газоразрядным люминесцентным преобразователем.

Рассмотрены основные параметры важнейшего метода радиационного неразрушающего контроля – радиографии.

Приведены работы по измерению различными типами детекторов экспозиционной и эквивалентных доз рентгеновского и гамма-излучения. Рассмотрены практические вопросы обеспечения радиаци-

онной безопасности и защиты от ионизирующих излучений при осуществлении контроля и диагностики.

В заключение рассмотрены математические методы обработки экспериментальных результатов.

В учебном пособии представлен лабораторный практикум по радиационному контролю и диагностике в объеме, соответствующем требованиям Государственного образовательного стандарта по направлению 551523 «Приборостроение» специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики», по направлению 220500 «Управление качеством» специальности 220501 «Управление качеством».

ГЛАВА 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

1.1. Определение линейного коэффициента ослабления фотонного излучения в железе, свинце и алюминии и приближенная оценка энергии фотонов

1.1.1. Цель работы

Экспериментальное определение значения величины линейного коэффициента ослабления излучения в железе, свинце и алюминии и нахождение приближенно энергии фотонов.

1.1.2. Краткое описание теории

Рассмотрим процесс прохождения гамма-квантов через вещество. В зависимости от энергии гамма-квантов, происходят различные процессы взаимодействия: фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар, фотоядерные реакции.

При энергиях примерно до 10 МэВ преобладают первые три эффекта.

Первый из них – фотоэлектрический эффект – процесс взаимодействия фотонов с каким-либо связанным электроном атома (чаще всего это К- или L-электроны). При этом происходит разрыв связи электрон-атом и вся энергия первичного фотона поглощается, а электрон с кинетической энергией E вырывается из атома:

$$E = h\nu - E_{св}, \quad (1)$$

где $E_{св}$ – энергия орбитального электрона.

Вероятность взаимодействия гамма-излучения с веществом характеризуется электронным, атомным, линейным коэффициентами поглощения. Для теоретических расчетов коэффициентов фотоэлектрического эффекта рекомендуют следующие формулы:

$$\tau_e = c \frac{Z^3}{(h\nu_0)^3}, \quad (2)$$

$$\tau_\alpha = \tau_e Z = c \frac{Z^4}{(h\nu_0)^3}, \quad (3)$$

$$\tau = N\tau_\alpha = c \frac{Z^4 L_0 \rho}{(h\nu_0)^3 A}, \quad (4)$$

где c – некоторый постоянный коэффициент; z – атомный номер элемента поглотителя; $h\nu_0$ – энергия фотона; ρ – плотность поглотителя, г/см³; L_0 – число Авогадро, $6,22 \cdot 10^{23}$ г·моль⁻¹; N – число атомов элемента в 1 см³; τ_e и τ_a – коэффициенты, приведенные к одному электрону и одному атому, имеют размерность площади. Единица их измерения 10^{-28} м² носит название «барн».

Постоянная величина τ имеет размерность обратной длины. Она характеризует среднее число столкновений на единице пути и определяет, соответственно этому, вероятность столкновения частиц с атомами вещества. Эта вероятность пропорциональна числу атомов в единице объема вещества.

Соотношение линейного коэффициента фотоэлектрического эффекта для различных элементов может быть определено по уравнению:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\rho_1 A_2}{\rho_2 A_1} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^4. \quad (5)$$

Вторым процессом является упругое рассеяние гамма-квантов на слабосвязанных электронах атома. Этим электронам атома передается только часть энергии первичных гамма-квантов, остальная энергия уносится рассеянным гамма-квантом.

Сечение комптоновского рассеяния, рассчитанное на один электрон, не зависит от материала среды и убывает с ростом энергии гамма-квантов. Значение его с высокой степенью точности может быть рассчитано по формуле Тамма–Клейна–Нишины. Атомный и линейный коэффициент комптоновского рассеяния определяются через электронный коэффициент комптоновского рассеяния по формулам:

$$\sigma_a = \tau_e z; \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_a N = \sigma_e z L_0 \cdot \rho / A. \quad (7)$$

Третьим процессом является образование электронно-позитронных пар – это процесс взаимодействия фотонов с полем заряженной частицы (с полем ядра и ранее с полем орбитального электрона), приводящий к поглощению фотона и образованию двух частиц – электрона и позитрона. В процессе образования пар практически вся энергия фотона тратится на кинетическую энергию электрона и позитрона и образования их массы, т. е.

$$h\nu_0 = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+}. \quad (8)$$

Следовательно, образование пар возможно при энергии фотона более, чем 1,022 МэВ. Сечение взаимодействия процесса образования пар зависит от атомного номера элемента и энергии фотона. Для ориентировочных расчетов используют следующие соотношения:

$$\kappa_e = Kz; \quad (9)$$

$$\kappa_a = Kz^2; \quad \kappa = Kz^2 L_0 \rho / A, \quad (10)$$

где K – коэффициент, зависящий от энергии фотона.

Гамма-кванты с энергией более 7 МэВ, взаимодействуя с ядрами вещества, способны выбивать протоны, нейтроны и даже альфа-частицы. Эти фотоядерные реакции типа (γ, n) , (γ, p) ; (γ, α) в сотни раз менее вероятны по сравнению с описанными выше.

Рассмотрим систему источник–поглотитель–детектор излучения–счетчик импульсов (см. рис. 1.1.1). В такой системе фактически измеряется ослабление первичного пучка гамма-квантов за счет их взаимодействия с поглотителем. Известно, что интенсивность прошедшего сквозь поглотитель и попавшего в детектор пучка определяется выражением:

$$J = J_0 e^{-\mu d} \quad (11)$$

$$\text{или } J / J_0 = e^{-\mu d}, \quad (12)$$

где J / J_0 – доля фотонов, которые остаются в пучке после прохождения слоя поглотителя толщиной d .

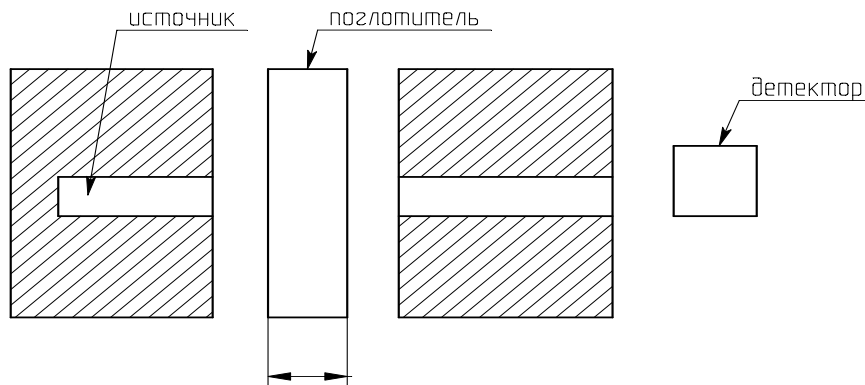


Рис. 1.1.1. Система: источник–поглотитель–детектор излучения

Каждый фотон, который выводится в процессе поглощения из пучка, поглощается индивидуально в отдельном акте. Поэтому число фотонов, поглощенных в слое поглотителя толщиной d_x , пропорционально величине d и числу падающих фотонов, а интегральная зависимость имеет экспоненциальную форму.

Величина μ называется полным линейным коэффициентом поглощения (коэффициентом ослабления), $[\text{см}^{-1}]$. Коэффициент μ , измеренный в опыте по схеме рис. 1.1.2, включает в себя как действительное поглощение фотонов, так и рассеяние из коллимированного пучка. Этот коэффициент называется коэффициентом поглощения для «узкого» пучка. Его величина больше той, которая была бы получена, если бы рассеянное излучение попало в детектор.

В связи с тем, что процессы взаимодействия фотонов не зависят друг от друга, полный коэффициент ослабления фотонов равен сумме коэффициентов всех процессов взаимодействия:

$$\mu = \tau + \sigma + \alpha. \quad (13)$$

Коэффициент ослабления можно рассчитать теоретически как для простого вещества, так и для сложного. При этом для определения линейного коэффициента ослабления для сложного вещества рекомендуется пользоваться следующей формулой:

$$\mu = \sum_i \mu_i n_i, \quad (14)$$

где n_i – доля i -го элемента; μ_i – линейный коэффициент ослабления i -го элемента.

Величина μ зависит от z -вещества и энергии фотонов. В качестве примера на рис. 1.1.3 приведена зависимость линейного коэффициента ослабления для свинца от энергии фотонов.

Линейный коэффициент ослабления можно определить экспериментальным путем.

1.1.3. Описание экспериментальной установки

Общая блок-схема установки для определения линейного коэффициента приведена на рис. 1.1.2. Источник ^{60}Co 1 находится в свинцовом стакане 2 с цилиндрическим коллимирующим отверстием вдоль оси. Коллимированный пучок гамма-квантов падает на поглотитель 3. Регистрация излучения, прошедшего коллимирующее отверстие 4 в боковой стенке свинцового домика ДС 5, осуществляется газоразрядным счетчиком 6 типа СТС-6. Импульсы детектора регистрируются радиометром 7 типа Б-4.

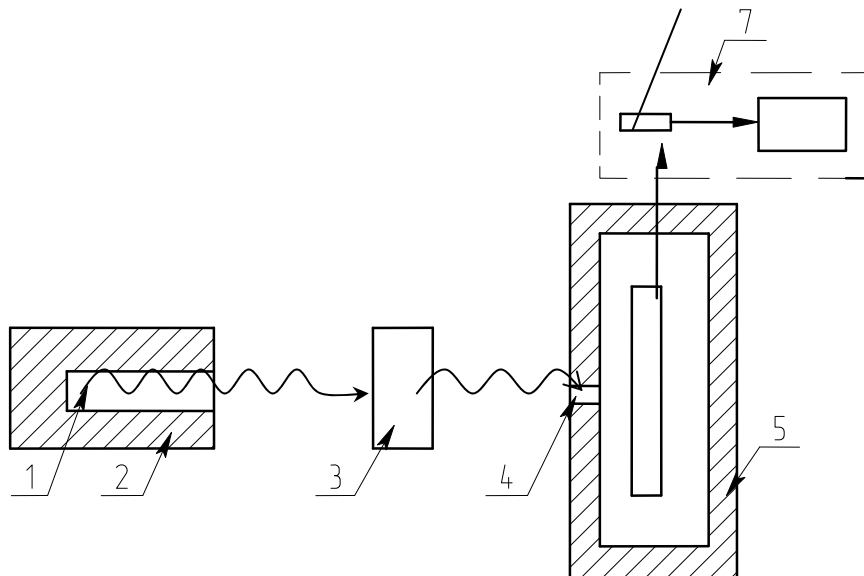


Рис. 1.1.2. Блок-схема установки для определения линейного коэффициента поглощения

1.1.4. Радиометр Б-4

1.1.4.1. Описание установки

Радиометр Б-4 предназначен для счета и регистрации импульсов от любых датчиков периодических импульсов.

Установка комплектуется из ряда блоков.

1. Блок газонаполненных счетчиков БГС-4 (7а).

Блок БГС является выносным и объединен с держателем газонаполненных счетчиков. С пересчетным прибором соединяется с помощью двух кабелей. По высоковольтному кабелю подается высокое напряжение для питания газонаполненного счетчика. По другому кабелю на БГС подается питание для схемы обработки и снимается сигнал. Возникающие при попадании в счетчик ионизирующих излучений импульсы через конденсатор подаются на эмиттерный повторитель. Импульсы отрицательной полярности с выхода БГС-4 по кабелю подаются на вход пересчетного прибора типа ПП-16.

2. Пересчетный прибор ПП-16(7Б).

Он включает в себя блок питания, блок управления работой прибора, пересчетное устройство.

1.1.4.2. Инструкция по эксплуатации

1. Включить шнур питания в сеть переменного тока с напряжением 220 В.

2. Переключатель «Знак полярности» на приборе ПП-16 поставить в положение .

3. Нажать и зафиксировать кнопку «Вход» 1:1.

4. Нажать любую из кнопок: «Стоп», «Пуск» или «50 Гц».

5. Осуществить трехминутный прогрев прибора.

6. Нажать кнопку «Сброс»; показания счетчика должны быть на нуле.

7. Нажать кнопку «Пуск» – счетчики должны показать отсчет импульсов фона со скоростью около 1 импульса за 10 с.

8. Убедившись в правильности работы счетчиков, нажать кнопку «Стоп». При этом счет должен прекращаться.

9. Нажать кнопку «Сброс». Показания счетчика должны быть сброшены на нуль. ПРИБОР К РАБОТЕ ГОТОВ!

1.1.5. Меры безопасности

При работе с электронными приборами:

1. Работа с установкой разрешается только после ознакомления с инструкцией по технике безопасности.

2. Работы с приборами установки на месте их размещения производятся с соблюдением «Правил техники безопасности по эксплуатации

электроустановок потребителей» и «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».

3. В приборах имеются напряжения, опасные для жизни, поэтому категорически запрещается работа с прибором, если на нем нет защитного кожуха и его корпус не заземлен.

4. После подачи высокого напряжения на счетчик дверцу свинцового домика не открывать.

При работе с закрытыми радиоактивными источниками:

1. Проводить работы только после определения скорости счета фона.

2. При работе с источниками гамма-излучения необходимо пользоваться защитными свинцовыми экранами.

3. Работать только с источниками минимальной активности.

Находиться от источника как можно дальше.

После окончания эксперимента немедленно сдать источник преподавателю.

1.1.6. Задание

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и описанием установки.

2. Изучить меры безопасности при работе с радиометром и радиоактивным источником.

3. По инструкции работы радиометра Б-4 включить и прогреть установку.

4. Определить скорость счета фона n_{ϕ} со статистической погрешностью 5 % (n_{ϕ} , имп/с).

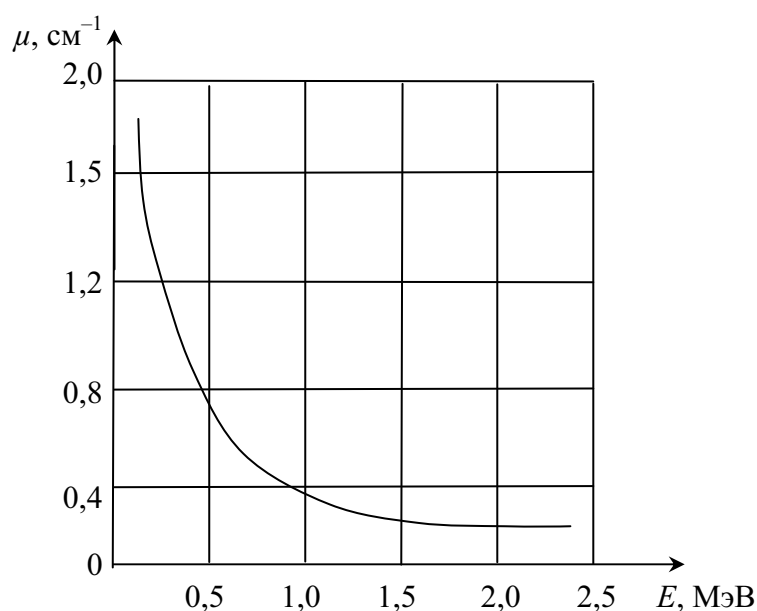


Рис. 1.1.3. Зависимость линейного коэффициента ослабления для свинца от энергии фотонов

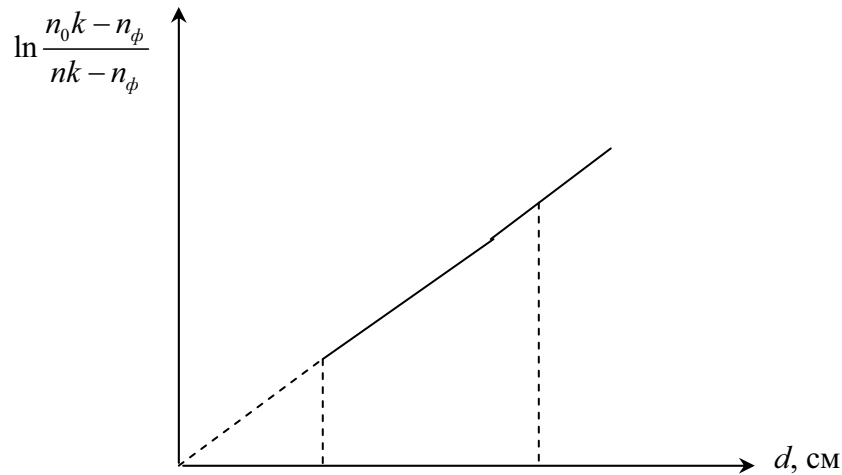


Рис. 1.1.4. Зависимость изменения $\ln \frac{n_0k - n_\phi}{nk - n_\phi}$ от толщины экрана

5. Направить пучок гамма-квантов от радиоактивного препарата Co^{60} из коллиматора на счетчик через коллимирующее отверстие в боковой стенке свинцового домика. Измерить скорость счета от препарата с фоном без поглотителя (статистическая погрешность измерения не хуже 5 %).

6. Снять зависимость скорости счета n , имп/с, от толщины поглотителя d , см, из свинца, железа и алюминия (статистическая погрешность измерения скорости счета не хуже 5 %).

7. Убрать коллиматор 4 и для одного из поглотителей провести экспериментально определение линейного коэффициента ослабления в плохой геометрии с учетом энергетического фактора накопления. Результаты измерения занести в отчетную таблицу.

8. Построить в линейном масштабе график зависимости от толщины экрана $\ln \frac{n_0k - n_\phi}{nk - n_\phi}$.

9. Графическим методом определить значения линейных коэффициентов ослабления для свинца, железа и алюминия.

10. Пользуясь зависимостью $\mu = f(E)$ (рис. 1.1.3), по найденному коэффициенту линейного ослабления гамма-квантов в свинце определить энергию фотонов и сравнить полученные результаты с энергией фотонов $\text{Co}^{60} = 1,25$ МэВ.

11. По таблицам найти значения линейных коэффициентов ослабления для энергии фотонов 1,25 МэВ для железа и алюминия, сравнить данные, полученные в эксперименте.

12. Сравнить результаты экспериментального определения линейного коэффициента ослабления в «узкой» и плохой геометрии эксперимента.

1.1.7. Методические указания по выполнению работы

1. Разделим общее число импульсов N на время счета t (с), находим скорость счета n , имп/с.

2. К пунктам 4; 5; 6.

Статистическая погрешность радиометрических измерений определяется на основании свойств закона Пуассона и его аппроксимации нормальным распределением с дисперсией, численно равной математическому ожиданию. Способ дает надежную оценку ошибок, обусловленных статистическими флуктуациями скорости счета. Надежность получаемых оценок не зависит от числа измерений и определяется общим числом зарегистрированных импульсов, возрастая пропорционально корню квадратному из их числа.

Относительная ошибка истинного среднего значения:

$$\delta = 1 / N \cdot 100 \%, \quad (15)$$

где N – число импульсов.

3. К пункту 7.

Результаты измерений рекомендуется занести в таблицу.

Число пластин поглотителя	Толщина слоя поглотителя d , см	Время измерения, с	Число регистрируемых импульсов, N	Скорость счета фона n_ϕ , имп/с	Скорость счета от препарата с фоном без поглотителя	Скорость счета от препарата n , имп/с поглотителем	$\ln \frac{n_0 k - n_\phi}{nk - n_\phi}$	Коэффициент линейного ослабления гамма-излучения	Энергия гамма-излучения E_γ , МэВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4. К пункту 8.

Если плотность потока фотонов в месте расположения детектора при отсутствии поглотителя Φ_0 , то после установки поглотителя толщиной d плотность потока будет равна:

$$\Phi_d = \Phi_0 e^{-\mu d} \quad (16)$$

или

$$\mu d = \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}. \quad (17)$$

Отсюда

$$\mu = \frac{1}{d} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}. \quad (18)$$

Скорость счета счетчика и плотность потока связаны соотношениями:

$$kn - n_{\phi} = b\Phi, \quad (19)$$

где n – скорость счета счетчика; n_{ϕ} – скорость счета фона; b – эффективность установки при регистрации фотонов данной энергии; k – поправка на мертвое время.

Тогда значение линейного коэффициента ослабления через скорость счета равно:

$$\mu = \frac{1}{\epsilon} \ln \frac{n_0 k - n_{\phi}}{nk - n_{\phi}}. \quad (20)$$

5. Поправку на мертвое время определяют по формуле

$$k = \frac{n}{1 - n\tau}, \quad (21)$$

где τ – разрешающее время прибора = $7 \cdot 10^{-5}$ с.

1.1.8. Контрольные вопросы

1. По какому закону происходит ослабление параллельного пучка гамма-излучения при прохождении через вещество?
2. Поясните качественно ход кривой зависимости коэффициента линейного ослабления гамма-излучения от энергии гамма-квантов.
3. Что такое газовый разряд?
4. Что такое рекомбинация?
5. Что такое мертвое время?
6. При каких условиях происходит лавинный процесс?
7. Какие материалы могут быть использованы для защиты от гамма-излучения?
8. Пояснить понятия «узкий» и «широкий» пучок излучения.
9. Что такое «фактор накопления»?

1.1.9. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Блок-схема установки и перечень приборов, используемых в работе.
3. Привести данные измерений и расчетов.
4. Привести зависимость изменения скорости счета от толщины защитного экрана для каждого поглотителя.
5. Привести средние значения коэффициентов поглощения для всех поглотителей.
6. Привести краткие ответы на контрольные вопросы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жуковский Ю.Г., Сергеев В.О., Антоньева Н.М. Практикум по ядерной физике. – М.: Высшая школа, 1975.
2. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. – М.: Атомиздат, 1963. – 225 с.
3. Тишкин П.А. Экспериментальные методы ядерной физики. – М.: МГУ, 1970.

1.2. Законы ослабления потоков ионизирующего излучения

1.2.1. Цель работы

Работа выполняется с целью практического изучения законов ослабления потоков ионизирующего излучения.

1.2.2. Перечень приборов и оборудования, используемых в лабораторной работе

1. Источники ионизирующего излучения: ^{137}Cs , ^{60}Co – 1 шт.
2. Коллиматоры – 2 шт.
3. Набор пластин из стали, меди, свинца, алюминия, полиэтилена – 1 шт.
4. Микрометр – 1 шт.
5. Мерная линейка – 1 шт.
6. Установка БГС-4 с ПП-16 – 1 шт.
7. Установка Б-2 с СПУ-1-1М – 1 шт.
8. Радиометр – 1 шт.

1.2.3. Программа проведения лабораторной работы

1. Определение длины свободного пробега гамма-кванта в зависимости от энергии излучения, плотности и порядкового номера вещества.
2. Определение энергии электронов по значению пробега в веществе. Определение значения величины экстраполированного пробега в различных материалах.
3. Определение энергии альфа-частиц по значению пробега в воздухе.
4. Определение сечения выведения нейтронов для гетерогенной среды (сталь+вода).

1.2.4. Законы ослабления пучков излучения

Способы передач энергии веществу различны. Ионизация – основной процесс передачи энергии веществу заряженными частицами с энергией до 20 МэВ. Для заряженных частиц характерна постепенная передача энергии в процессе многократного столкновения с электронами среды без значительного отклонения направления движения от первоначального. Важнейшими физическими характеристиками заряжен-

ных частиц являются линейная потеря энергии на пути единичной длины и пробег их в веществе.

Для заряженных частиц с большой энергией существенен процесс образования тормозного фотонного излучения. Тормозные гамма-кванты, в свою очередь, могут образовывать электрон-позитронные пары, а также вторичные электроны при фотоэффекте. Так образуются электронно-фотонные лавины.

В отличие от заряженных частиц, нейтроны и гамма-кванты могут передавать свою энергию веществу не в процессе многократного рассеяния, а в результате одного акта взаимодействия: они могут быть поглощены электронами или ядрами при одном из первых соударений.

Для гамма-квантов это относится к процессу их фотоэлектрического поглощения связанными электронами и эффекту образования пар, а для нейтронов – к реакциям захвата ядрами атомов.

Наряду с процессами поглощения, важную роль во взаимодействии гамма-кванта с веществом играет комптоновское рассеяние их на свободных электронах, а во взаимодействии нейтронов с веществом – упругое и неупругое их рассеяние на ядрах. В этих процессах происходят значительно большие, чем у заряженных частиц, энергетические потери и изменение направления рассеиваемых излучений. Поэтому для нейтронов и гамма-квантов более характерна не линейная, а объемная потеря энергии. Следствием больших отклонений от первоначального направления при рассеянии этих частиц является экспоненциальный характер уменьшения количества частиц в коллимированном пучке первоначального излучения.

«Хорошей» геометрией, или геометрией «узкого пучка», называется геометрия измерения, при которой детектор регистрирует только то излучение, которое не испытало взаимодействия с атомами мишени. Регистрируемое излучение в этом случае имеет тот же спектральный состав и угловое распределение, что и первичное излучение, падающее на мишень.

Для осуществления условий хорошей геометрии необходимо иметь узкий коллимированный пучок излучения (см. рис. 1.1.1). В этом случае при выборе направления X для распространения коллимированного пучка частиц можно записать равенство некоторой постоянной величины Σ отношению убыли числа частиц $-dn(x) / dx$ на отрезке dx и концентрации этих частиц в пределах того же отрезка dx :

$$-\frac{1}{n(x)} \cdot \frac{dn(x)}{dx} = \Sigma. \quad (1)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$n(x) = n(x=0) \exp(-\Sigma x). \quad (2)$$

Постоянная величина Σ имеет размерность обратной длины и характеризует среднее число столкновений на единичном пути. Соответственно этому, она определяет вероятность столкновений частиц с атомами вещества (для нейтронов с ядрами, для гамма-квантов в основном с электронами). Эта вероятность пропорциональна количеству ядер в 1 см^2 вещества $N = \rho \cdot N_A / A$ (где N_A – число Авогадро; A – атомная масса вещества; ρ – его плотность в г/см^3) и равна: $\Sigma = N\sigma$.

Здесь σ – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность площади. Этот коэффициент называют микроскопическим полным сечением взаимодействия. Его единица измерения $1 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$. В отличие от σ , вероятностная величина Σ для нейтронов называется макроскопическим полным сечением. Для гамма-квантов ее называют линейным коэффициентом ослабления и обозначают символом μ .

Величины Σ^{-1} и μ^{-1} имеют размерность длины и называются длиной свободного пробега. На расстоянии, равном одной длине свободного пробега, интенсивность коллимированного пучка нейтронов (или γ -квантов) уменьшается в e раз.

Для характеристики ослабления узкого пучка излучения иногда используют понятие слоя половинного ослабления. Под ним понимают толщину слоя материала мишени, ослабляющую этот пучок в два раза. Обозначив эту толщину $d_{1/2}$, можно записать, что $d_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu$ (3).

Аналогично можно говорить о слое десятикратного ослабления $d_{1/10} = 2,3 / \mu$ и т. д.

«Плохая» геометрия обычно характеризуется тем, что кроме первичного излучения, детектор регистрирует заметную долю рассеянного излучения или вторичных частиц. Это бывает в случае «широкого» первичного пучка. В условиях плохой геометрии ослабление интенсивности в зависимости от толщины мишени происходит не по экспоненциальному закону: эффективный коэффициент ослабления меньше, чем истинный коэффициент ослабления, измеренный в условиях хорошей геометрии. Спектральный состав и угловое распределение регистрируемого излучения существенно отличается от спектрального состава и углового распределения первичного пучка и зависит от взаимного расположения детектора, источника и поглотителей.

Так, интенсивность широкого пучка γ -лучей, прошедших через слой вещества x , описывается соотношением

$$I = I_0 e^{-\mu x} B(\mu x, E\gamma, z), \quad (4)$$

где B – коэффициент накопления, $E\gamma$ – энергия γ -квантов, z – порядковый номер элемента вещества мишени. B – равен отношению полной

регистрируемой интенсивности к интенсивности первичного излучения (с энергией $E\gamma$).

Взаимодействие заряженных частиц с веществом

К заряженным частицам относятся электроны (включая отрицательные и положительные β -частицы), положительные и отрицательные мезоны и гипероны, протоны, дейтроны, α -частицы и ядра (ионы) более тяжелых элементов. Взаимодействие этих частиц с электронами, атомами и ядрами происходит через кулоновские, электромагнитные и ядерные силы. Поэтому число различных процессов взаимодействия достаточно велико. Основными механизмами взаимодействия заряженных частиц с веществом являются электромагнитное взаимодействие с электронами вещества (ионизация) и кулоновским полем ядра и электронов (тормозное излучение), а также внутриядерные взаимодействия с нуклонами ядра.

Процессы взаимодействия разделяют на упругие и неупругие. Взаимодействия называются упругими, если сумма кинетических энергий взаимодействующих частиц до и после взаимодействия сохраняется неизменной. При неупругом взаимодействии часть кинетической энергии передается образовавшимся свободным частицам или γ -квантам. Такими процессами являются неупругое рассеяние, ионизация и возбуждение атомов, испускание тормозного излучения, расщепление и возбуждение ядер.

Для разных частиц различных диапазонов энергии преобладают те или иные процессы. Основное различие во взаимодействии тяжелых и легких заряженных частиц состоит в том, что для легких частиц существенны потери энергии в результате электромагнитного излучения (радиационные потери энергии). Полная потеря энергии заряженной частицы на единичном пути (тормозная способность среды) складывается в основном из ионизационных и радиационных потерь (см. рис. 1.2.2) и определяет ее пробег в среде:

$$R(E) = \int_0^E dE \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Различают три вида пробега заряженных частиц в веществе: средний, максимальный и экстраполированный (или практический). Максимальный пробег моноэнергетических электронов определяется толщиной слоя вещества, при которой ни один из падающих нормально электронов из него не вылетает. Вследствие диффузии медленных электронов максимальный пробег моноэнергетических электронов несколько меньше истинной длины пути электрона в веществе, но и близок к ней. На практике, при анализе экспериментальной кривой функции ослабле-

ния моноэнергетических электронов (зависимость Y / Y_0 числа электронов, прошедших через слой вещества, от его длины – см. рис. 1.2.3), за R_{\max} принимают абсциссу точки, в которой интенсивность прошедших электронов принимает значение фона. Для нахождения экстраполированного пробега R , экстраполируют линейную часть кривой ослабления до пересечения с кривой фона измерений.

При расчете пробега по формуле (5) предполагают, что электроны теряют свою энергию постепенно, малыми порциями, темп их замедления изменяется плавно в соответствии с характером зависимости $(-dE/dx)$ от энергии. Длина пробега получается при этом вполне однозначной функцией начальной энергии электрона. В действительности, взаимодействие электронов с атомами вещества носит вероятностный характер, а потери энергии испытывают флуктуации относительно средних значений. Поэтому и пробеги электронов имеют определяемый разброс относительно среднего пробега R_{cp} , хорошо описываемый распределениями Гаусса.

Иногда пользуются понятием слоя половинного поглощения, который определяется как толщина барьера, поглощающего половину падающего пучка электронов.

На практике, при определении пробега альфа-частиц, часто используют понятие относительной тормозной способности S по сравнению со стандартным веществом, например воздухом, т. е. отношение тормозной способности воздуха S_a и тормозной способности вещества S_z с порядковым номером z (при одной и той же энергии).

Тормозную способность можно выразить как потерю энергии на единице длины пути – это линейная тормозная способность. Тогда относительная линейная тормозная способность:

$$S_L = \frac{S_a}{S_z} = \frac{\bar{R}_a}{\bar{R}_z}, \quad (6)$$

где \bar{R}_z , \bar{R}_a – средний пробег частиц в веществе с порядковым номером z и в воздухе соответственно, см; относительная массовая тормозная способность:

$$S_m = \frac{\rho_a \bar{R}_a}{\rho_z \bar{R}_z}. \quad (7)$$

Здесь определяется потеря энергии на единице толщины слоя вещества, выраженной через массу, приходящуюся на единицу площади; ρ_z , ρ_a – плотность вещества с порядковым номером z и воздуха соответственно, г/см³.

Относительную тормозную способность можно рассчитать также на атом вещества; относительная атомная тормозная способность:

$$S_a = \frac{\rho_b \cdot \bar{R}_b \cdot A_z}{\rho_z \cdot \bar{R}_z \cdot A_b}, \quad (8)$$

где A_z ; $A_b = 14,4$ – атомная масса вещества и воздуха, соответственно.

Установлено, что отношение $\frac{S_a}{\sqrt{A_z}}$ приблизительно постоянно для различных химических элементов и равно около 0,3. В этом случае выражение (8) примет вид:

$$\frac{S_a}{\sqrt{A_z}} = 0,3 = \frac{\rho_b \cdot \bar{R}_b \cdot \sqrt{A_z}}{\rho_z \cdot \bar{R}_z \cdot A_b}. \quad (9)$$

Связь между энергией и пробегом альфа-частиц

На основании экспериментальных данных между средним пробегом α -частицы в воздухе и ее энергией установлены эмпирические соотношения. В частности, Гейгер получил эмпирическое соотношение между пробегом α -частиц в воздухе и их энергией (при 0 °С и 760 мм рт. ст.) вида:

$$\bar{R}_{\alpha_b} = 0,309 E_{\alpha}^{\frac{2}{3}}, \text{ см}, \quad (10)$$

где E_{α} – энергия α -частиц, МэВ.

Соотношение (10) справедливо в диапазоне энергий от 3 до 8 МэВ с погрешностью до 5 %. При температуре воздуха 15 °С рекомендуют использовать выражение:

$$\bar{R}_{\alpha_b} = 0,318 E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}, \text{ см}. \quad (11)$$

Для упрощения можно пользоваться формулой (с погрешностью до 8 %)

$$R_{\alpha_b} \approx \frac{1}{3} \cdot \sqrt{E_{\alpha}^3}, \text{ см} \quad (12)$$

Длина пробега альфа-частиц в других средах может быть определена по формуле Брэгга:

$$\bar{R}_{\alpha} = 10^{-4} \sqrt{\frac{A \cdot E_{\alpha}^3}{\rho}}, \text{ см}. \quad (13)$$

И более точно при известном порядковом номере z :

$$\bar{R}_{\alpha} = \frac{10^{-4} \cdot A \sqrt{E_{\alpha}^3}}{\rho \sqrt[3]{z^2}}, \text{ см}. \quad (14)$$

Используя выражение (9) для тормозной способности, получим:

$$\bar{R}_\alpha = \frac{\rho_e \cdot \bar{R} \alpha_e \sqrt{A_z}}{0,3 \cdot A_e \cdot \rho_z} = 3 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\bar{R} \alpha_e \sqrt{A_z}}{\rho_z}. \quad (15)$$

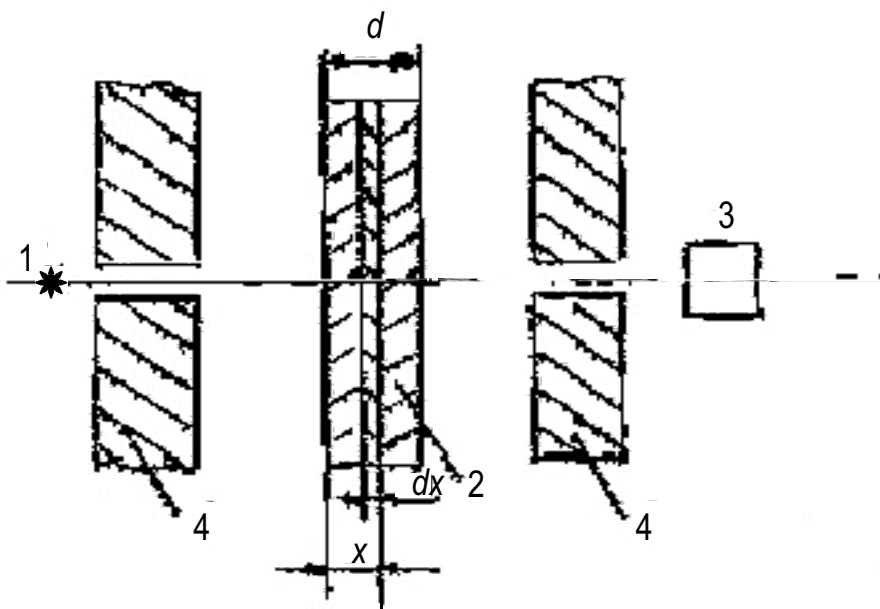


Рис. 1.2.1. Геометрия узкого пучка:

1 – источник; 2 – объект контроля; 3 – детектор; 4 – коллиматор

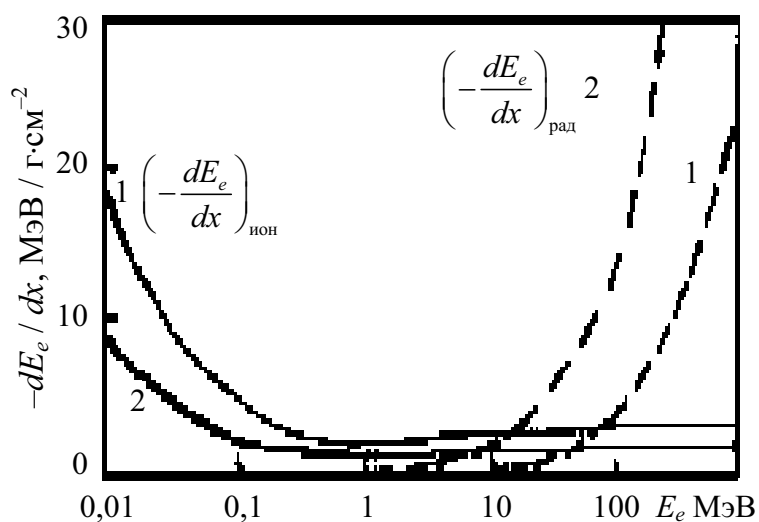


Рис. 1.2.2. Ионизация и радиационные потери энергии электронов на 1 г/см^2 вещества: 1 – в воздухе; 2 – в свинце

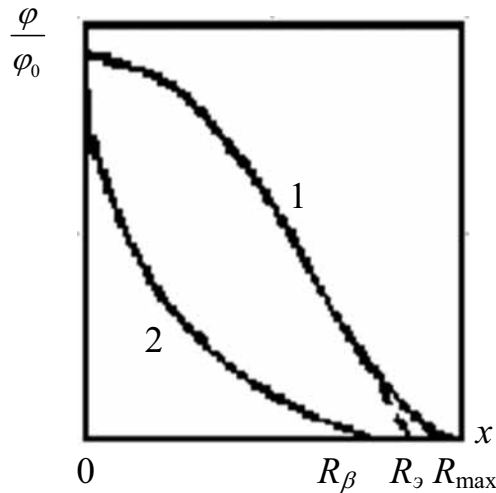


Рис. 1.2.3. Функция ослабления в веществе:
1 – моноэнергетических электронов; 2 – бета-частиц

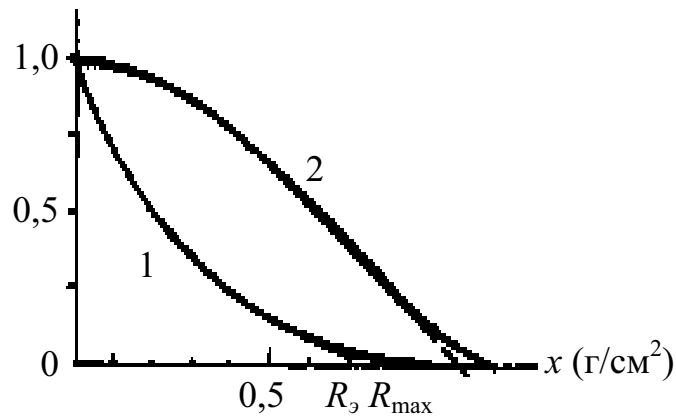


Рис. 1.2.4. Относительная плотность потока:
1 – пучка электронов с максимальной энергией 1,9 МэВ;
2 – моноэнергетических электронов с энергией 1,9 МэВ

Связь между энергией и пробегом в алюминии моноэнергетических электронов

В качестве стандартного тормозящего вещества в опытах по исследованию пробега электронов используют алюминий. Обычно величину экстраполированного пробега R_9 определяют для некоторой энергетической области электронов. Так, при энергии $E_0 > 0,6$ МэВ хорошо работает эмпирическая зависимость:

$$R_9 = 0,526 \cdot E_0 - 0,094, \quad (16)$$

где размерность R_9 в г/см^2 ; а E_0 – в МэВ.

В области энергий от 0,01 до 2,5 МэВ целесообразно использовать формулу Катца и Пенфольда:

$$R_s = 0,142 \cdot E^{(1,265 - 0,0954 \log E_\beta)}, \quad (17)$$

где R_s измеряется в $\text{мг}/\text{см}^2$, а E_0 в МэВ.

В области энергии $E_0 > 2,5$ МэВ можно пользоваться выражением

$$R_s = 0,53E_0 - 0,106, \quad (18)$$

где размерности аналогичны размерности в (17).

В области энергии от 10 до 23 МэВ величину максимального пробега можно найти по формуле

$$R_{\max} = 0,246 E_0, \quad (19)$$

здесь R_{\max} измеряется в см, E_0 – в МэВ.

В области энергии от 10 до 100 МэВ рекомендуют использовать формулу Фелдмана:

$$R_{\max} = 250 \cdot \frac{A}{\rho} \cdot \left(\frac{E_0}{Z^{\frac{1}{2}}} \right)^n, \quad (20)$$

где $n = 1,2 / (1 - 0,29 \lg z)$, A , z , ρ – соответственно, массовое число, порядковый номер и плотность вещества. R_{\max} измеряется в ангстремах, E_0 – в кэВ.

При энергии $E_0 \approx 10$ кэВ можно использовать выражение

$$R_{\max} [A^0] = 260 \cdot E_0^{1,7}. \quad (21)$$

В области от 10 до 160 кэВ можно пользоваться формулой для моноэнергетических электронов:

$$R_{\max} [\text{мм} / \text{см}^2] = 773 E_{0\beta}^{1,7} [\text{МэВ}], \quad (22)$$

для моноэнергетических позитронов:

$$R_{\max} [\text{мм} / \text{см}] = 759 E_{0\beta^+}^{1,72}. \quad (23)$$

Пробег моноэнергетических электронов можно вычислить путем интегрирования средних потерь энергии:

$$\bar{R} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(dE/dx)_{\text{ион}}}. \quad (24)$$

В области энергий, где в первом приближении можно принять $\frac{d\bar{E}}{dx} = \text{const}$, получим:

$$\bar{R} = E_0 / \left(\frac{d\bar{E}}{dx} \right)_{\text{ион}}. \quad (25)$$

Тогда при той же энергии электронов E_0 в разных веществах средние пробеги будут обратно пропорциональны средним потерям энергии и тормозным способностям поглотителей:

$$\frac{\bar{R}_1}{R_2} = \frac{-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right)_{\text{uon2}}}{-\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right)_{\text{uon1}}} \approx \frac{\rho_2 \cdot z_2 / A_2}{\rho_1 \cdot z_1 / A_1} \quad (26)$$

или

$$\bar{R}_2 \rho = \bar{R}_1 \rho_1 \frac{z_1 / A_1}{z_2 / A_2} \text{ г/см}^2. \quad (27)$$

Так как z / A изменяется незначительно, произведение $R \cdot \rho$ близко к постоянному значению. В частности, для платины и алюминия эти величины отличаются на 20 %.

Закон ослабления плотности потока электронов в веществе в зависимости от толщины поглотителя различен для моноэнергетических электронов и для бета-частиц с непрерывным спектром. На рис. 1.2.4 приведены кривые ослабления для бета-частиц: 1 – с максимальной энергией $E_\beta = 1,9$ МэВ и 2 – для коллимированного пучка моноэнергетических электронов с энергией $E_0 = 1,9$ МэВ. Видно, что эти кривые различны. Значительная часть кривой 1 подобна экспоненте. Это позволяет (в пределах экспоненциальной части кривой 1) описать закон ослабления бета-частиц с непрерывным спектром формулой $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$, где I – плотность потока бета-частиц за слоем поглотителя толщиной x ; I_0 – плотность потока бета-частиц в падающем на поглотитель пучке; μ – линейный коэффициент ослабления, зависящий от энергии бета-частиц и от порядкового номера вещества поглотителя.

Используя выражение (27), можно оценить величину слоя половинного ослабления δ_β :

$$\delta_\beta = \frac{0,693}{\mu}. \quad (28)$$

Из выражения (28) следует, что линейный коэффициент ослабления $\mu = 0,693 / \delta_\beta$ [см⁻¹] и для получения массового коэффициента ослабления нужно δ_β выразить в единицах [г/см²]:

$$\mu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,693}{\delta_\beta \rho}. \quad (29)$$

В области энергий $0,5 < E_\beta < 6$ МэВ для оценки μ_m в алюминии предложено эмпирическое соотношение:

$$\mu_m = 22 E_\beta^{-1,33}, \quad (30)$$

где E_β дано в МэВ.

Величину слоя половинного поглощения бета-частиц в алюминии (в условиях цилиндрической геометрии) можно найти по формуле

$$\delta_{\beta} = 38 E_{\beta}^{3/2} [\text{МэВ}]. \quad (31)$$

Связь между толщиной слоя половинного поглощения бета-частиц в алюминии и других материалах устанавливается соотношением:

$$\delta_{\beta}(x) = \delta_{\beta}(\text{Al}) \frac{1,27}{(1 + Ax/100)}, \quad (32)$$

где Ax – средний атомный вес поглощающего вещества.

В случае направленного спектра бета-частиц длина пробега обычно определяется в алюминии, при этом, как правило, используется эмпирическое соотношение:

$$R_{\beta} = AE_{\beta} - B, \quad (33)$$

где R_{β} и E_{β} – максимальный пробег и максимальная энергия бета-спектра соответственно.

Для различных диапазонов энергий разными авторами было предположено множество значений этих постоянных, например:

$$R_{\beta} = 0,407E_{\beta}^{1,38} \text{ г/см}^2 \text{ Al, для } 0,15 \leq E_{\beta} \leq 0,8 \text{ МэВ}, \quad (34)$$

$$R_{\beta} = 0,542E_{\beta} - 0,133 \text{ г/см}^2 \text{ Al, для } 0,8 \leq E_{\beta} \leq 3 \text{ МэВ}. \quad (35)$$

Для воздуха и легких материалов рекомендуют следующие формулы:

$$R_{\beta}^{603} \approx 400E_{\beta} \text{ см}; \quad (36)$$

$$R_{\beta} \approx 0,2E_{\beta}, \text{ см, для } E_{\beta} > 0,5 \text{ МэВ}; \quad (37)$$

$$R_{\beta} \approx 0,1E_{\beta} \text{ см, для } E_{\beta} < 0,5 \text{ МэВ}. \quad (38)$$

Существуют и другие полуэмпирические соотношения для нахождения максимального пробега в алюминии:

$$R_{\beta} = 0,11 \left(\sqrt{1 + 22,4E_{\beta}^2} - 1 \right), \text{ для } 0 < E_{\beta} < 3 \text{ МэВ}; \quad (39)$$

$$R_{\beta} = 0,543E_{\beta} - 0,16, \text{ для } E_{\beta} > 0,8 \text{ МэВ}; \quad (40)$$

$$R_{\beta} = 0,571E_{\beta} - 0,161, \text{ для } E_{\beta} > 1 \text{ МэВ}. \quad (41)$$

Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Электромагнитное излучение в виде гамма-квантов высокой энергии (высокой частоты), обычно испускаемое возбужденными атомами или образующееся при торможении электронов в веществе, называется гамма-излучением или рентгеновским излучением соответственно. Это излучение взаимодействует с электронами атома, нуклонами ядра, с электрическим полем, окружающим заряженные частицы (ядро и электроны), и с мезонным полем, окружающим мезоны. Любой из этих че-

тырех видов взаимодействия может привести к полному поглощению излучения, упругому (когерентному) и неупругому (некогерентному) рассеянию. Каждый из четырех видов взаимодействия может привести к любому из трех конечных результатов, поэтому возможны 12 типов процессов.

В области энергий гамма-квантов от 20 кэВ до 10 МэВ основными процессами взаимодействия с веществом являются фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и образование электронно-позитронных пар.

Фотоэлектрический эффект

При атомном фотоэффекте падающий γ -квант поглощается и передает всю свою энергию одному из атомных электронов, обычно расположенному близко к ядру (т. е. имеющему большую энергию связи с ядром), и выбивает его из атома. При этом кинетическая энергия фотоэлектрона равна энергии поглощенного гамма-кванта за вычетом энергии связи электрона на данной оболочке. После выбивания связанного электрона атом остается в возбужденном состоянии и акт фотопоглощения завершается испусканием вторичного низкоэнергетического характеристического гамма-излучения (флуоресценцией) или Оже-эффектом (выходом одного или нескольких Оже-электронов).

Основную роль в фотоэффекте играют электроны К-оболочки, обладающие наибольшей энергией связи, и сечение фотоэффекта на К-оболочке – $\sigma_{ф.к}$ – обычно составляет около 80 % полного сечения фотоэффекта. Таким образом, приближенно:

$$\sigma_{ф} \approx 1,25 \sigma_{ф.к}. \quad (42)$$

Если энергия гамма-кванта меньше энергии связи К-электрона $E_{к}$, то из атома могут быть выбиты только электроны с L- и более высоких оболочек. Энергия $E_{к}$ для разных элементов равна (10...140) кэВ, а энергия ионизации L-оболочки $E_{к}$ не превышает 30 кэВ.

Существует много формул, выражающих зависимость $\sigma_{ф}$ от z и E_{γ} , полученных как теоретически, так и эмпирически. Выведенные теоретически на основе квантовой электродинамики формулы для общего случая любой E_{γ} и любого z носят приближенный характер и имеют сложный вид, и расчеты по ним могут быть доведены до численного результата лишь в частных случаях. Поэтому на практике лучше всего пользоваться справочными данными.

Качественная зависимость функции $\sigma_{ф.к}(E_{\gamma}z)$ дается приближенной формулой Заутера для гамма-квантов больших энергий ($E_{\gamma} \gg m_0 \cdot c^2$):

$$\sigma_{\phi,к} \approx 4\pi r_0^2 z^5 m_0 c^2 / (137 E_\gamma) \quad (43)$$

и приближенной формулой Гайтлера для нерелятивистской области энергий ($E_\gamma \ll m_0 \cdot c^2$):

$$\sigma_{\phi,к} \approx 32\sqrt{2}\pi r_0^2 (m_0 c^2)^{7/2} / (3 \cdot 137^4 E_\gamma^{7/2}), \quad (44)$$

где $r_0 = c^2 / m_0 c^2 = 2,82 \cdot 10^{-13}$ см классический радиус электрона, m_0 – масса покоя электрона, c – скорость света.

Из (43) и (44) следует, что $\sigma_{\phi,к}$ убывает в релятивистской области с возрастанием энергии E_γ медленнее (как E_γ^{-1}), чем в нерелятивистской (как $E_\gamma^{-7/2}$), пропорционально z^5 . Поэтому фотоэффект играет существенную роль лишь для небольших энергий гамма-квантов и для тяжелых веществ, т. е. материалов с большим z . Сечение фотоэффекта для различных материалов лежит в пределах $10^3 \dots 10^4$ барн (при $E_\gamma \approx 0,1$ МэВ).

Комптоновское рассеяние

В отличие от фотоэффекта, комптоновское рассеяние не приводит к полному поглощению гамма-кванта. Этот процесс состоит в следующем.

Гамма-квант в результате упругого взаимодействия с электроном передает ему часть энергии и изменяет направление своего движения. Поскольку энергия гамма-кванта обычно значительно больше энергии связи электрона в атоме, а скорость атомных электронов мала по сравнению со скоростью света, то электрон до взаимодействия с гамма-квантом можно с хорошей точностью считать свободным и покоящимся. Используя это условие и законы сохранения энергии и импульса, можно получить связь между углом рассеяния θ_s и энергией гамма-кванта до и после рассеяния:

$$E_\gamma / E'_\gamma = \left[1 + \left(E'_\gamma (m_0 c^2) (1 - \cos \theta_s) \right) \right]^{-1}. \quad (45)$$

Здесь E'_γ и E_γ – энергия падающего и рассеянного квантов соответственно.

Введя понятие безразмерной энергии кванта в единицах энергии покоя электрона – $m_0 \cdot c^2$, т. е. $\alpha = E_\gamma / m_0 c^2$, получим:

$$\alpha / \alpha' = \left[1 + \alpha' (1 - \cos \theta_s) \right]^{-1}. \quad (46)$$

Максимальная потеря энергии происходит при рассеянии назад ($\theta_s = \pi$). При этом энергия гамма-кванта после рассеяния составляет:

$$E_\gamma = E'_\gamma \left(1 + 3,914 E'_\gamma \right). \quad (47)$$

В процессе комптоновского взаимодействия гамма-кванты рассеиваются по углам $0 \leq \theta_s \leq \pi$. Направление же комптоновских электронов отдачи составляет с направлением движения первичного гамма-кванта угол $\varphi \leq \pi/2$.

Дифференциальное угловое сечение комптоновского взаимодействия гамма-кванта с веществом $\sigma_k(E_\gamma, \theta_s)$ выражается формулой Клейна–Нишины–Тамма ($\text{см}^2/\text{ср}$):

$$\sigma_k(\alpha', \theta_s) = \frac{zr_0}{2} [1 + \alpha'(1 - \cos \theta_s)] \cdot \left[1 + \cos^2 \theta_s + \frac{(\alpha')(1 - \cos \theta_s)}{1 + \alpha'(1 - \cos \theta_s)} \right]. \quad (48)$$

При $\alpha' \rightarrow 0$ из выражения (50) получаем классическую формулу Томпсона ($\text{см}^2/\text{ср}$):

$$\sigma_k(\theta_s) = zr_0^2 (1 + \cos^2 \theta_s) / 2. \quad (49)$$

Интегрирование формулы (48) по телесному углу дает выражение для полного сечения комптоновского взаимодействия:

$$\sigma_k(\alpha') = 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{1 + \alpha'}{(\alpha')^2} \left[\frac{2(1 + \alpha')}{1 + 2\alpha'} - \frac{\ln(1 + 2\alpha')}{\alpha'} \right] + \frac{\ln(1 + 2\alpha')}{(2\alpha')} - \frac{1 + 3\alpha'}{(1 + 2\alpha')^2} \right\}. \quad (50)$$

Энергию электронов отдачи и сечение их образования можно найти из выражений:

$$E_e = E_\gamma \alpha (1 - \cos \theta_s) / [\alpha (1 - \cos \theta_s) + 1] = 2E_\gamma \alpha [1 + 2\alpha + (1 + \alpha)^2 \text{tg}^2 \varphi]; \quad (51)$$

$$\sigma_k(E'_\gamma, E_e) = \pi r_0^2 m_0 c^2 z \left\{ \left[\frac{m_0 c^2 E_e}{(E'_\gamma)^2} \right]^2 + 2 \left[\frac{(E'_\gamma - E_e)}{E'_\gamma} \right]^2 + \frac{(E'_\gamma - E_e) E_e (E_e - 2m_0 c^2)}{(E'_\gamma)^2} \right\} / (E'_\gamma - E_e)^2. \quad (52)$$

Образование электронно-позитронных пар

В поле ядра или атомного электрона гамма-квант может превратиться в электронно-позитронную пару, которой передается вся энергия падающего гамма-кванта (доля энергии, передаваемая ядру отдачи, очень мала, обычно меньше 5 кэВ). Кинетическая энергия пары в поле ядра равна энергии гамма-кванта минус энергия покоя образованной пары ($2m_0 c^2$). Следовательно, процесс образования пар имеет энергетический порог, равный примерно $2m_0 c^2 = 1,022$ МэВ.

При образовании пары в поле электрона энергия отдачи этого электрона весьма велика и пороговая энергия для этого процесса практически удваивается. Количественно вероятность образования пар в поле атомных электронов пропорциональна z , а сечение образования пар (σ_n)

в поле ядра пропорционально z^2 . Это сечение монотонно возрастает от нуля при пороговой энергии, изменяется приблизительно линейно с E_γ примерно постоянного значения в области энергий, близких к 50 МэВ, в материалах с высоким z и при еще большие энергиях в материалах с низким z . Максимальное сечение составляет примерно 100 барн.

Поскольку σ_π в поле электрона примерно в z раз меньше σ_n в поле ядра и при этом составляет менее 2 % полного сечения, то роль этого процесса в переносе квантов малосущественна.

Электрон и позитрон испускаются преимущественно в том же направлении, в каком двигался падающий квант, особенно когда энергия гамма-кванта E'_γ и его импульс велики. Основная часть электронов и позитронов движется в пределах угла $0,5 \text{ МэВ}/E_\gamma$, (радиан) относительно направления движения гамма-кванта. Энергия гамма-кванта распределяется почти поровну между электроном и позитроном. Однако с ростом E_γ доля энергии позитрона несколько увеличивается.

Выражение для σ_n как функции E'_γ и z имеет в общем случае сложный вид.

При $2m_0c^2 \leq E'_\gamma \leq 137m_0c^2z^{-1/3}$ довольно точные результаты дает теория Бете-Гайтлера:

$$\sigma_n(E'_\gamma) = (r_0^2 z^2 / 137) \left[(28/9) \ln(2E'_\gamma / m_0c^2 - 218/27) \right]. \quad (53)$$

Коэффициенты ослабления гамма-излучения в веществе

Макроскопические сечения взаимодействия излучения с веществом (см^{-1}) получается из микроскопических ($\text{см}^2/\text{атом}$) умножением на число ядер в единице объема N . Поэтому для фотоэффекта $\Sigma_\phi = \sigma_\phi N$, для комптоновского взаимодействия $\Sigma_\kappa = \sigma_\kappa N$; для образования пар $\Sigma_n = \sigma_n N$. Макроскопические сечения Σ_ϕ , Σ_κ , Σ_n называются линейными коэффициентом фотоэффекта, комптоновского взаимодействия и образования пар соответственно.

Сумму этих парциальных макроскопических сечений называют линейным коэффициентом ослабления гамма-излучения в веществе:

$$\mu = \Sigma_\phi + \Sigma_\kappa + \Sigma_n. \quad (54)$$

Соответственно, полное микроскопическое сечение взаимодействия гамма-излучения с веществом:

$$\sigma = \sigma_\phi + \sigma_\kappa + \sigma_n. \quad (55)$$

Поскольку в расчетах этих коэффициентов не учитывается акты многократного рассеяния, их также называют коэффициентами ослабления узкого пучка гамма-квантов. Величину, обратную линейному ко-

эффиценту ослабления, называют длиной свободного пробега гамма-квантов в веществе. В этом случае величина интенсивности пучка излучения I , прошедшего через слой вещества X , находится по формуле

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (56)$$

где I_0 – интенсивность падающего пучка гамма-излучения.

Вместо линейного коэффициента μ часто используют массовый коэффициент ослабления μ_m (см²/г):

$$\mu_m = \mu / \rho = (\Sigma_\phi + \Sigma_\kappa + \Sigma_n) / \rho. \quad (57)$$

Если вещество является химическим соединением различных атомов или их смесью, то его массовый коэффициент определяется усреднением μ_m отдельных составляющих, с учетом их массового содержания:

$$\mu_m = \sum w_i \mu_{m,i}. \quad (58)$$

Здесь w_i – массовая доля i -го элемента с массовым коэффициентом ослабления μ_{mi} .

Коэффициент ослабления суммарного гамма-излучения $\mu(\mu_m)$ характеризует суммарную вероятность взаимодействия с веществом, приводящего как к поглощению, так и к рассеянию гамма-квантов. Для характеристики степени поглощения гамма-квантов вводится коэффициент поглощения энергии излучения $\mu_{эн}$, или коэффициент истинного поглощения энергии гамма-квантов (коэффициент электронного преобразования), т. е. коэффициент передачи этой энергии электронам вещества. Если пренебречь вторичным флуоресцирующим и тормозным излучениями при образовании пар (поскольку эти излучения низкой энергии, они обычно поглощаются в местах их образования), то

$$\mu_{эн} = \mu - \Sigma_\kappa = \Sigma_\phi + \Sigma_a + \Sigma_n. \quad (59)$$

Таким образом, $\mu_{эн}$ численно равен μ , за вычетом сечения истинного комптоновского рассеяния Σ_κ .

Таблицы полных μ и $\mu_{эн}$ γ -излучения для различных элементов можно найти в ряде справочников.

1.2.5. Определение длины свободного пробега гамма-квантов в зависимости от энергии излучения, плотности и порядкового номера элемента вещества

Для нахождения зависимости длины свободного пробега гамма-квантов от энергии излучения, плотности и порядкового номера элемента вещества необходимо знать зависимость коэффициента ослабления μ от этих параметров. Величину μ можно определить по формуле (51) или по слою половинного ослабления излучения. И в том, и в другом случае

необходимо знать величину интенсивности I_0 при толщине поглотителя $X = 0$, и величину I при произвольных значениях X , в том числе и при $X = d_{1/2}$.

Из формулы (56) следует, что μ – тангенс угла наклона прямой, построенной в полулогарифмическом масштабе.

1.2.6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации установки БГС-4 с ПП-16.

2. Привести установку в рабочее состояние.

3. Провести измерение фона.

4. Провести измерения значений интенсивности гамма-излучения в геометрии «узкого пучка», используя поочередно источники ионизирующего излучения Cs-137 и Co-60 и поглотители из алюминия, стали, свинца и меди.

5. По результатам измерения построить графики зависимости логарифма интенсивности излучения от толщины поглотителя и найти значения μ .

6. Определить слой половинного ослабления и найти значения μ .

7. Используя полученные значения, сделать вывод о зависимости коэффициентов μ от энергии гамма-излучения, плотности и порядкового номера вещества.

8. Статистическая погрешность измерений 3–5 %.

9. Определение энергии электронов по величине пробега в веществе. Определение экстраполированного пробега в различных материалах.

1.2.7. Определение энергии электронов по величине пробега в веществе.

Определение экстраполированного пробега в различных материалах

Максимальная энергия бета-излучения находится по максимальному пробегу бета-частиц, для определения которого наиболее часто используются прямым и сравнительным методами.

Сущность прямого метода заключается в определении максимального пробега бета-частиц непосредственно по поглощению бета-излучений в экранах и вычислении максимальной энергии бета-излучений по эмпирическим формулам.

Кривая поглощения бета-излучения показывает зависимость интенсивности бета-излучения данного элемента от толщины экрана, выраженной в г/см^2 . Кривая строится в полулогарифмическом масштабе и пересекает ось абсцисс, так как в этом случае бета-излучение фактически полностью поглощается.

Зависимость между максимальной энергией бета-излучения E_{\max} и максимальном пробегом бета-частиц R_{\max} различна для различных величин пробегов и может быть найдена по формулам:

$$E_{\max} = 1,85R_{\max} + 0,245[\text{МэВ}](R_{\max} > 0,3 \text{ г/см}^2); \quad (59)$$

$$E_{\max} = 1,92R_{\max} + 0,725[\text{МэВ}](0,03 < R_{\max} < 0,3 \text{ г/см}^2). \quad (60)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации установки Б-2 с СПУИ-ИМ.

2. Привести установку в рабочее состояние.

3. Определить фон.

4. Определить интенсивность бета-излучения от источников без поглотителя.

5. Определить интенсивность бета-излучения от источников с поглощающими экранами, увеличивая толщину слоя поглотителя до тех пор, пока показания прибора не станут близкими к фону.

6. Построить кривую поглощения бета-излучения в полулогарифмическом масштабе и определить величину максимального пробега бета-частиц, экстраполируя кривую до пересечения с осью абсцисс.

7. Вычислить значения максимальной энергии по максимальному пробегу по соответствующим формулам.

8. Определить величину экстраполированного пробега в алюминии, меди, полиэтилене и оргстекле.

9. Статистическая погрешность измерений 3–5 %.

1.2.8. Определение энергии альфа-частиц по величине пробега в воздухе и алюминии

Для определения энергии альфа-частиц необходимо найти их пробег в воздухе или в каком-либо другом веществе. Затем воспользоваться одной из формул (10–15), соответствующей условиям эксперимента.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации радиометра.

2. Привести радиометр в рабочее состояние.

3. Провести измерения фона.

4. Провести измерения плотности потока альфа-частиц от источника без поглотителя.

5. Провести измерения плотности потока альфа-частиц от источника с поглощающими экранами из алюминия, увеличивая толщину слоя поглотителя до тех пор, пока показания прибора не станут близки к фону.

6. По толщине слоя полного поглощения определить энергию альфа-частиц.

7. Провести измерения плотности потоков альфа-частиц от источника, удаляя его от детектора до тех пор, пока показания прибора не станут близкими к фону; при этом между детектором и источником нет других поглотителей, кроме воздуха.

8. По величине пробега в воздухе определить энергию альфа-частиц.

1.2.9. Контрольные вопросы

1. Чем объяснить различные значения максимального пробега моноэнергетических электронов, получаемых экспериментально при одних и тех же условиях? Характерно ли это для альфа-частиц?

2. Можно ли пользоваться формулами для определения экстраполированного пробега моноэнергетических электронов, если источник бета-излучения имеет линейчатый или непрерывный спектр?

3. Виды взаимодействий гамма-излучений с веществом и их краткая характеристика.

4. Найти энергию гамма-квантов, рассеянных вперед, назад и под углом $\pi/2$.

5. Зависимость сечения взаимодействия гамма-излучения с веществом от энергии.

1.2.10. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Название и принцип действия приборов.

3. Краткие теоретические сведения.

4. Порядок выполнения работы

5. Результаты измерений и их обработка, графики.

6. Выводы о работе.

7. Ответы на контрольные вопросы.

ГЛАВА 2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Изучение рентгеновских аппаратов типа МИРА-2Д, АРИНА-02

2.1.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы рентгеновских аппаратов МИРА-2Д, АРИНА-02, изучить работу принципиальных схем, измерить дозиметром 2712 дозы за 100 секунд на расстоянии 1 метр и 0,5 метра.

2.1.2. Приборы и материалы

Рентгеновские аппараты типа МИРА-2Д, АРИНА-02, дозиметр 2712.

2.1.3. Общие сведения

В основе работы импульсного аппарата лежит принцип накопления энергии за сравнительно долгий промежуток времени и последующей ее реализации за существенно более короткий промежуток. Все аппараты серии АРИНА выполнены по одной принципиальной схеме (рис. 2.1.1).

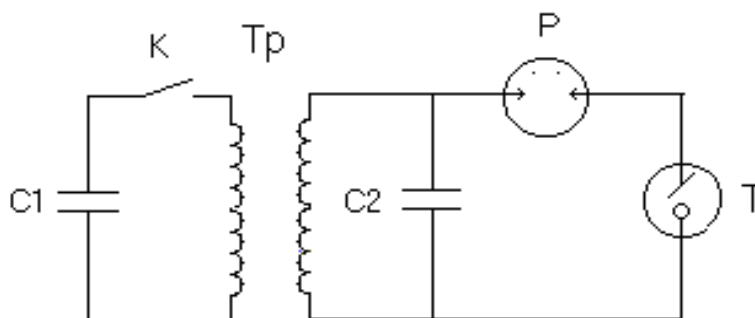


Рис. 2.1.1. Эквивалентная электрическая схема аппарата серии АРИНА:
C1 – накопительный конденсатор; *K* – ключ; *Tr* – импульсный трансформатор;
C2 – разрядная ёмкость; *P* – разрядник-обостритель;
T – рентгеновская трубка

При замыкании ключа *K* предварительно заряженный накопительный конденсатор *C1* разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора *Tr*. При этом во вторичной его обмотке возникает импульс высокого напряжения длительностью порядка 10^{-6} с, заряжающий выходную емкость *C2* до напряжения 100...200 кВ, в зависимости от типа аппарата.

Разрядник-обостритель *P* преобразует энергию, накопленную в емкости *C2*, в импульс высокого напряжения длительностью 10^{-8} с, который прикладывается к электродам рентгеновской трубки *T*.

В аппаратах АРИНА используется не обычная рентгеновская трубка с накальным катодом, а так называемая трубка с взрывной электронной эмиссией.

В качестве катода в такой трубке используется вольфрамовая фольга толщиной несколько микрометров.

Под действием импульса высокого напряжения очень короткой длительности (который обеспечивается разрядником-обострителем) кромка вольфрамового катода взрывается, образуется облако плазмы, которая является источником электронов. Далее процесс ускорения электронов и возбуждения рентгеновского излучения протекает так же, как и в классических рентгеновских трубках с накальным катодом.

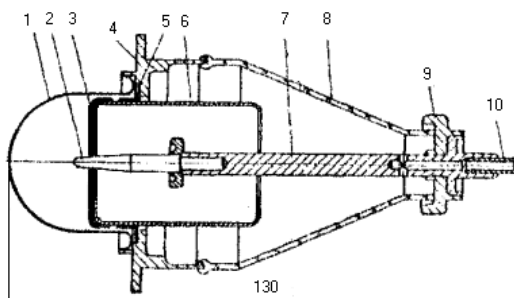
Итак, вместо термоэмиссии – плазменная эмиссия, вместо накаливаемого катода – холодный катод.

При этом необходимым и главным условием образования электронной плазмы является короткий импульс высокого напряжения.

Импульсный трансформатор, разрядник-обостритель и рентгеновская трубка располагаются в металлическом цилиндре, заполненном трансформаторным маслом. Этот цилиндр, в дальнейшем будем называть его высоковольтным блоком, является сердцем всего аппарата. Он определяет ресурс работы прибора, его массогабаритные и рентгеновские характеристики. Исходя из этого, рассмотрим более подробно конструктивные особенности каждого из перечисленных элементов.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются 2 типа импульсных рентгеновских трубок

На рис. 2.1.2 изображен схематический разрез так называемой игольчатой рентгеновской трубки типа ИМА 5-320Д.



*Рис. 2.1.2. Конструкция импульсной рентгеновской трубки ИМА 5-320Д:
1 – выходное окно; 2 – анод; 3 – катод; 4, 9 – фланцы; 5 – кольцо; 6 – экран;
7 – вывод; 8 – стекло; 10 – штенгель*

Максимальное рабочее напряжение ее составляет 320 кВ. Лезвийный катод 3 в виде шайбы изготовлен из вольфрамовой фольги толщиной 20 мкм. Внутренняя кромка шайбы и является взрывной кромкой,

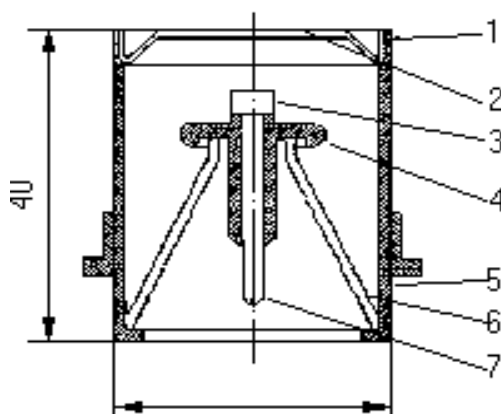
эмитирующей плазму. Анод 2 выполнен из вольфрамового прутка диаметром 4 мм, заточенного на конус. Конец этого прутка является фокусным пятном трубки. Диаметр его примерно равен 2 мм.

Анод припаян к стальному стержню-выводу 7, соединенному с малым фланцем 9. Большой фланец 4 электрически соединен с катодом. К этому фланцу приварено выходное окно 1, имеющее форму полусферического купола. Оно изготовлено из ковара (сплава Co, Fe и Ni, имеющего коэффициент расширения такой же, как у стекла) толщиной 0,2 мм.

Стальной экран 6, на котором непосредственно укреплен катод, жестко соединен с большим фланцем с помощью кольца 5. Основное назначение экрана – препятствовать осаждению на стеклянный изолятор 8 паров вольфрама, образующихся при плазменном разряде.

Штенгель 10 служит для вакуумной откачки объема трубки при ее изготовлении.

В аппарате АРИНА-1 используется трубка «прострельного» типа ИМА 2-150Д.



*Рис. 2.1.3. Конструкция импульсной рентгеновской трубки ИМА 2-150Д:
1 – выходное окно; 2 – анод; 3 – катод; 4 – электрод; 5 – корпус; 6 – изолятор;
7 – штенгель с максимальным напряжением 150 кВ*

Здесь катод 3 выполнен из вольфрамовой трубки диаметром 2 мм с толщиной стенки 0,2 мм и установлен на грибовидный электрод 4. Данный электрод защищает стеклянный конический изолятор 6 от конденсации паров металла.

К металлическому цилиндрическому корпусу 5 припаяно выходное плоское окно 1 из ковара толщиной 0,2 мм.

В данной трубке электроны из плазмы, образующейся на кончике цилиндрического катода, бомбардируют плоский заземленный анод, а рентгеновские фотоны проходят сквозь него и выходное окно. Достоинством такой конструкции является возможность размещения исследуемого объекта вплотную у выходного окна трубки. Недостатком же явля-

ется менее четкое фокусное пятно. К тому же оно имеет большие размеры по сравнению с игольчатой трубкой.

Прострельный вольфрамовый анод 2 приварен непосредственно к выходному окну. Штенгель 7 предназначен для вакуумной откачки трубки.

Как та, так и другая описанные рентгеновские трубки имеют существенно меньшие габариты по сравнению с классическими накальными трубками. Объясняется это тем, что при столь коротких воздействиях высокого напряжения (10^{-8} с) длина стеклянного изолятора сокращается в несколько раз по сравнению с изоляторами в трубках с постоянным напряжением. Длина же изолятора и определяет геометрические размеры любой трубки.

Основным элементом высоковольтного блока, его «ахиллесовой пятой», определяющей срок службы аппарата, является разрядник-обостритель. Именно он вырабатывает чрезвычайно короткий импульс высокого напряжения, обеспечивающий образование электронной плазмы в районе катода рентгеновской трубки.

На рис. 2.1.4 изображен разрез разрядника-обострителя Р-43, который используется в аппаратах АРИНА-1 и АРИНА-05-2М.

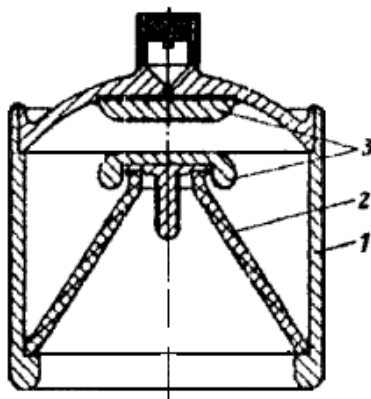


Рис.2.1.4. Конструкция разрядника-обострителя Р-43:
1 – корпус, 2 – изолятор, 3 – электроды

Он состоит из стального цилиндрического корпуса 1, керамического изолятора 2 в виде усеченного конуса и двух электродов из тугоплавкого металла 3, один из них припаян к крышке корпуса, другой – к изолятору. Рабочий объем разрядника заполнен техническим водородом или азотом под давлением 30...40 атмосфер (кПа). Благодаря столь высокому давлению, при пробое межэлектродного зазора электрический импульс с выхода импульсного трансформатора сокращается по длительности примерно в 100 раз, что и обеспечивает взрыв микроострий катода рентгеновской трубки.

Напряжение срабатывания разрядника-обострителя является рабочим напряжением рентгеновской трубки. Поэтому для данного конкретного разрядника оно всегда одно и то же и не может регулироваться.

Разрядник имеет два резьбовых вывода, с помощью которых он с одной стороны соединяется с импульсным трансформатором, а с другой – с рентгеновской трубкой. Металлический корпус разрядника совместно с корпусом высоковольтного блока образуют конструктивную выходную емкость C_2 (см. рис. 2.1.1), которая разряжается через рентгеновскую трубку. Именно величина этой емкости определяет амплитуду импульса тока в трубке, а, следовательно, и интенсивность рентгеновской вспышки.

Амплитуда импульса тока в описываемых аппаратах составляет (500...1000) А при длительности (10...20) нс, а частота следования импульсов составляет (5...20) Гц, в зависимости от марки аппарата. Нетрудно вычислить, что средний ток через рентгеновскую трубку при этом находится в пределах (0,1...0,5) мА. Величина среднего тока зависит от амплитуды импульса, его длительности и частоты следования импульсов. В отличие от классических накаливаемых трубок, в трубках с взрывным катодом средний ток, так же как и высокое напряжение, не регулируется и определяется только частотой следования импульсов излучения.

Напряжение срабатывания разрядников – обострителей типа Р-43 находятся в интервале (140...170) кВ. Выбирая разрядник с той или иной величиной напряжения срабатывания, в каждом конкретном случае можно наиболее полно соблюсти требования ГОСТ 20426-82 с точки зрения соответствия контролируемой толщины изделия рабочему напряжению трубки. Рабочее напряжение рентгеновской трубки, как уже отмечалось, точно равняется величине напряжения срабатывания разрядника.

В аппарате АРИНА-3 применяется разрядник – обостритель типа Р-49, конструкция которого аналогична конструкции разрядника Р-43, только интервал напряжения срабатывания его лежит в пределах (190...240) кВ. Следовательно, и рентгеновская трубка в аппарате АРИНА-3 работает при более высоких напряжениях, по сравнению с аппаратом АРИНА-05-2М.

Многих потребителей вводит в заблуждение значение напряжения на трубке, указанное в ее паспорте.

Следует иметь в виду, что это значение – максимально допустимое для данного типа трубки. Реальное же рабочее напряжение всегда определяется значением напряжения срабатывания разрядника – обострителя.

Так, в аппаратах АРИНА-05-2М и АРИНА-3 используется трубка ИМА 5-320Д с максимальным напряжением 320 кВ. Рабочее же напряжение ее в аппарате АРИНА-05-2М составляет (160...170) кВ, а в аппарате АРИНА-3 – (200...240) кВ.

В аппарате АРИНА-1 используется трубка ИМА 2-150Д с максимальным напряжением 150 кВ, ее рабочий режим лежит в пределах 140...150 кВ. Разрядник-обостритель определяет не только напряжение срабатывания рентгеновской трубки, но и, как уже отмечалось, срок службы высоковольтного блока. Именно он, а не трубка, в первую очередь выходит из строя через 100–150 часов работы аппарата. Поэтому замена трубки без замены разрядника-обострителя, как правило, не приводит к положительному результату.

Третьим и последним элементом высоковольтного блока является импульсный трансформатор. При его проектировании учитывались следующие основные требования:

- длительность фронта импульса высокого напряжения на его выходе не должна превышать 1...2 мкс. При большей ее величине возможен пробой изолятора разрядника-обострителя;
- трансформатор должен обладать высоким коэффициентом связи для получения необходимого выходного напряжения при сравнительно небольшом входном напряжении;
- трансформатор должен иметь минимальные габариты и массу при высокой электрической прочности.

В процессе длительного периода проектирования моделей рентгеновских аппаратов, удалось создать конструкцию импульсного трансформатора, наиболее полно отвечающую перечисленным, противоречащим друг другу требованиям.

Трансформатор выполнен в виде цилиндра, в середине которого расположен ферритовый сердечник 4, набранный из колец, диаметр которых зависит от импульсной мощности аппарата.

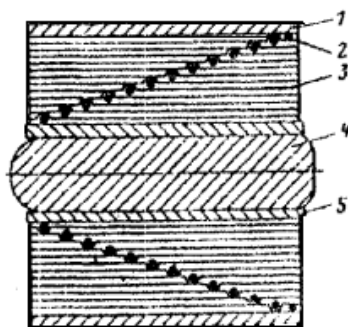


Рис. 2.1.5. Конструкция импульсного трансформатора:

*1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – изолятор; 4 – сердечник;
5 – цилиндр*

Выходная обмотка 2 намотана проводом ПЭВ-2 диаметром 0,4 мм на металлический цилиндр 5, причем каждый ее виток изолирован от соседнего конденсаторной бумагой 3 марки КОИ-22.

Общее количество витков выходной обмотки, а также количество ее рядов определяется выходным напряжением, то есть напряжением срабатывания разрядника-обострителя. Как правило, выходное напряжение трансформатора на (20–25) % превышает напряжение срабатывания разрядника-обострителя.

Поскольку на верхних витках обмотки, имеющих значительно больший диаметр по сравнению с витками, расположенными непосредственно на ферритовом сердечнике, наводится большее напряжение, количество слоев изоляции между витками постепенно увеличивается. Так, например, если первые витки изолируются одним слоем бумаги, то последние уже содержат 2–3 слоя.

Первичная обмотка 1 трансформатора выполнена из медной фольги толщиной 0,1 мм. Ширина фольги перекрывает длину намотки выходной обмотки. Таким образом, витки выходной обмотки как бы расположены внутри коаксиала, образованного цилиндром 5 и первичной обмоткой, что существенно уменьшает градиенты высокого напряжения на торцах трансформатора. Последний виток первичной обмотки соединен с корпусом высоковольтного блока. Высоковольтный вывод выходной обмотки расположен внутри ферритового сердечника. В него ввинчивается резьбовой контакт разрядника-обострителя. Описанная конструкция импульсного трансформатора позволила достичь уникальных результатов с точки зрения его габаритов. Достаточно сказать, что трансформатор с выходным напряжением порядка 200 кВ имеет диаметр 70 мм и длину 60 мм.

Импульсный трансформатор 1, разрядник-обостритель 2 и рентгеновская трубка 3, последовательно соединяясь друг с другом, образуют как бы единый внутренний электрод коаксиала, наружным электродом которого является корпус высоковольтного блока 4.

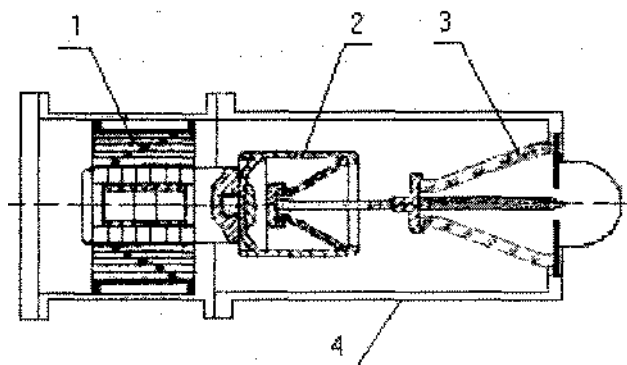


Рис. 2.1.6. Конструкция высоковольтного блока:
1 – импульсный трансформатор; 2 – разрядник-обостритель;
3 – рентгеновская трубка; 4 – корпус

Такая конструкция обеспечивает минимальные габариты и высокий КПД, как высоковольтного блока, так и всего аппарата в целом.

Внутренний объем высоковольтного блока вакуумирован и залит трансформаторным маслом с электрической прочностью порядка 30 кВ/мм.

Рассмотрим принципиальную схему, изображенную на рис. 2.1.7.

Помимо элементов, входящих в высоковольтный блок (импульсный трансформатор, разрядник-обостритель, рентгеновская трубка), она содержит ключ K и первичный накопительный конденсатор $C1$.

В качестве ключа в аппаратах АРИНА используется двухэлектродный разрядник, конструктивно похожий на разрядник-обостритель, но заполненный газом при сравнительно низком давлении (не больше нескольких атмосфер). Вследствие этого напряжение срабатывания его составляет 8...10 кВ.

Главным требованием, предъявляемым к конструкции ключа, является стабильность его срабатывания. В серийно выпускаемых коммутаторах типа Р-90 и Р-13 разброс напряжения срабатывания не превышает 10 %. Этого вполне достаточно для устойчивой работы всего высоковольтного контура, так как импульсный трансформатор имеет запас по напряжению порядка (20–25) %.

Ресурс работы коммутаторов Р-13 и Р-90, по крайней мере, в 2 раза превышает ресурс работы разрядников-обострителей.

Вот почему при замене высоковольтного блока аппарат АРИНА может снова работать достаточно долго.

В качестве накопительных конденсаторов в аппаратах АРИНА используются высоковольтные конденсаторы типа К 75-15 с рабочим напряжением 35 кВ и емкостью от 0,1 мкФ до 1 мкФ. В зависимости от мощности аппарата и его рабочего напряжения, первичная емкость набирается из нескольких указанных конденсаторов, соединенных последовательно. Конденсаторы К75-15 обладают высокой электрической прочностью и практически неограниченным ресурсом.

Высоковольтный блок, первичный коммутатор и накопительный конденсатор расположены в едином металлическом корпусе и образуют рентгеновский блок аппарата.

Помимо рентгеновского блока, аппараты АРИНА-05 и АРИНА-3 содержат пульт управления, в котором расположены источник постоянного напряжения 10 кВ, предназначенный для заряда накопительных конденсаторов, счетчик импульсов рентгеновского излучения и цепи управления и контроля.

2.1.4. Устройство и работа аппарата

Аппарат состоит из двух основных частей: рентгеновского блока, в котором расположена рентгеновская трубка и портативный импульсный источник высокого напряжения, и пульта управления, включающего в себя первичный источник напряжения, цепи управления и контроля.

Питание аппарата осуществляется от сети переменного тока 220 В, и частотой 50 Гц с помощью сетевого пульта управления и (при соответствующем исполнении аппарата) как от сети, так и от аккумуляторной батареи, с помощью универсального пульта управления.

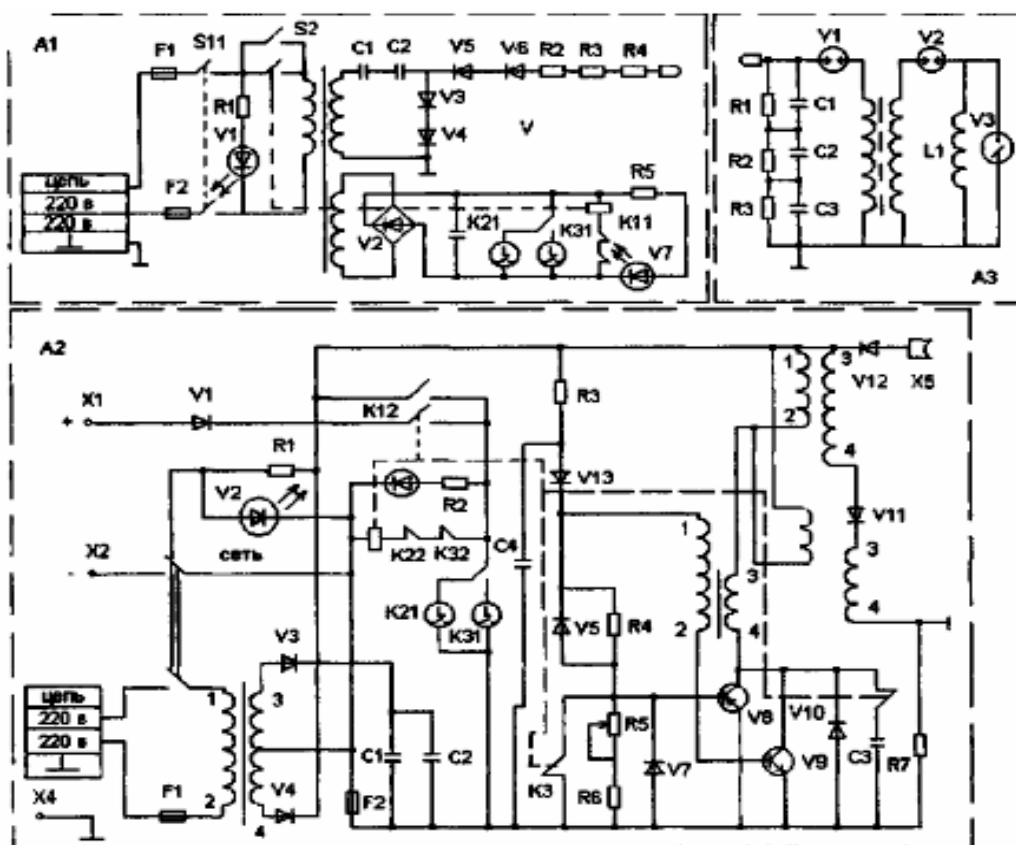


Рис. 2.1.7. Принципиальная электрическая схема аппарата АРИНА:
A1 – пульт управления; *A2* – аккумуляторная батарея;
A3 – блок рентгеновский

Каждый из пультов управления преобразует соответствующее напряжение питания аппарата в высокое напряжение 10 кВ, которое через высоковольтный кабель подается в блок рентгеновский.

Пульт управления, питающийся от сети, *A1* (рис. 2.1.7), включает в себя повышающий силовой трансформатор *T1* и диодно-емкостной удвоитель напряжения *C1, C2, V3...V6*. Пульт управления, питающийся как от сети, так и от аккумуляторной батареи *A2*, содержит транзисторный преобразователь напряжения.

Принцип работы преобразователя состоит в периодическом накоплении энергии аккумуляторного источника питания в магнитном поле сердечника трансформатора и преобразовании её в высокое напряжение при быстром прерывании тока первичной обмотки силовым транзисторным ключом. Сердечник трансформатора с вторичными обмотками представляет собой генератор тока, от которого происходит периодический подзаряд накопительных конденсаторов рентгеновского блока. Силовой ключ, прерывающий ток первичной обмотки трансформатора, представляет блокинг-генератор на транзисторах $V8$, $V9$, работающий в режиме автоколебаний с обратной связью по току. Конструктивно трансформатор $T3$ и выпрямители $V11$, $V12$ находятся в залитом трансформаторным маслом герметическом блоке, что обеспечивает высокую надежность изоляции и хороший теплоотвод. С выхода пульта управления высокое напряжение через высоковольтный кабель поступает в блок рентгеновский $A3$ и заряжает его накопительные конденсаторы $C1...C3$ до напряжения срабатывания коммутирующего разрядника $V1$. После его срабатывания они разряжаются через первичную обмотку импульсного трансформатора T . При достижении на его вторичной обмотке напряжения срабатывания разрядника-обострителя $V2$, последний коммутирует высокое напряжение на рентгеновскую трубку $V3$.

Амплитуда напряжения рентгеновской трубки составляет (140...170) кВ и определяется напряжением срабатывания разрядника-обострителя. Длительность рентгеновского импульса определяется временем разряда питающей ёмкости через рентгеновскую трубку и составляет 10^{-8} с.

После окончания рентгеновского импульса процесс заряда повторяется вновь. Частота следования рентгеновских импульсов составляет 8...9 Гц и зависит от значения напряжения питания. Поэтому, при работе от частично разряженной аккумуляторной батареи, время экспозиции следует соответствующим образом увеличить.

Для компенсации его теплового расширения высоковольтный блок снабжён сильфоном. Герметичное крепление рентгеновской трубки осуществляется специальной гайкой. Наружную поверхность рентгеновской трубки от механических повреждений предохраняет защитный колпачок.

В аппарате используется рентгеновская трубка с взрывной эмиссией электронов, не требующая накала и прогрева для подготовки к работе. Напряжение на трубке и ток в ней не регулируются.

2.1.5. Импульсный рентгеновский аппарат МИРА-2Д

Назначение

Аппарат предназначен для рентгенодефектоскопии деталей, узлов и конструкций в труднодоступных местах. В частности, аппарат может быть использован для контроля сварных соединений магистральных трубопроводов.

Принцип действия

Принцип действия аппарата основан на явлении вспышки рентгеновского излучения в двухэлектродной рентгеновской трубке с холодным катодом под действием короткого импульса высокого напряжения, формируемого с помощью малогабаритного высоковольтного генератора.

Основные технические преимущества

Аппарат МИРА-2Д по ряду технических параметров превосходит рентгеновские дефектоскопы как непрерывного, так и импульсного действия. Аппарат отличается чрезвычайно малыми габаритами и весом. Мощность, потребляемая аппаратом, незначительная. Высокая частота следования вспышек резко сокращает экспозицию при просвечивании. Для работы с аппаратом не требуется никаких подготовительных и настроечных операций, а для производства снимка достаточно 1 мин.

Основные технические данные:

1. Эффективная энергия рентгеновского излучения, кэВ100–120
2. Частота следования импульсов, Гц.....10–15
3. Угол излучения, град.....180
4. Экспозиционная доза излучения за 5 с на расстоянии 0,5 м мР-40
5. Диаметр фокусного пятна, мм, не более3
6. Толщина стали, доступная для рентгенографирования, мм.....20
7. Напряжение питания (50 Гц), В220
8. Потребляемая мощность, ВА.....400

Принцип действия заключается в следующем. Под действием короткого импульса высокого напряжения, формируемого с помощью разрядника-обострителя $V9$ и катушки индуктивности L , возникает вспышка рентгеновского излучения в двухэлектродной трубке с холодным катодом $V10$.

Напряжение на разрядник-обостритель $V9$ поступает со вторичной обмотки импульсного трансформатора $T2$ в момент разряда накопительных конденсаторов $C4-C6$ через его первичную обмотку и первичный разрядник $V8$. Заряжаются конденсаторы $C4-C6$ с помощью несимметричной схемы удвоения напряжения $C1, C2, V2-V7$ и зарядного трансформатора $T1$, повышающего напряжение питающей сети до 5 кВ.

Схемой удвоения это напряжение увеличивается до 8...9 кВ, после чего происходит пробой разрядника V_8 . В результате во вторичной обмотке трансформатора T_2 возникает импульс отрицательной полярности длительностью порядка 2...3 мкс с амплитудой 200 кВ. Разрядник-обостритель V_9 преобразует этот импульс длительностью, равной 10...8 с, который подается на катод рентгеновской трубки.

Порядок проведения работы

1. Изучить техническую инструкцию по эксплуатации МИРА-2Д, АРИНА-02.
2. Изучить инструкцию по эксплуатации дозиметра КД 2712.
3. Установить рентгеновский аппарат МИРА-2Д на расстояние 1 м от дозиметра; провести измерения с помощью пультов рентгеновского аппарата и дозиметра КД 2712; установить время набора показаний $t = 100$ с.
4. Прodelать то же самое для расстояния 0,5 м.
5. Аналогичные испытания провести для рентгеновского аппарата АРИНА-02.
6. Сравнить полученные результаты с дозовой характеристикой аппаратов согласно технической инструкции приборов.
7. Сделать выводы.

2.1.6. Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия рентгеновской трубки аппарата МИРА-2Д, АРИНА-02.
2. Объяснить работу принципиальной схемы.
3. Дать определение экспозиционной и эквивалентной дозы.

2.1.7. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Перечень оборудования.
3. Порядок выполнения работы.
4. Привести данные зависимости дозы от расстояния.
5. Вывод.

Список литературы

1. Инструкция по технической эксплуатации аппарата МИРА-2Д.
2. Инструкция по технической эксплуатации аппарата АРИНА-02.
3. Техническая инструкция по эксплуатации дозиметра КД-2712.
4. Быстров Ю.А., Иванов С.А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы: учебник для вузов по спец. «Электронные приборы». – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

2.2. Изучение работы бетатрона

2.2.1. Назначение

МИБ-6 – малогабаритный бетатрон с импульсным питанием; является источником высокоэнергетического тормозного излучения и предназначен для использования в области радиационного неразрушающего контроля. Бетатрон МИБ-6 предназначен в основном для диагностики строительных конструкций. Бетатрон рекомендуется для контроля железобетонных изделий – опор мостов, фундаментов зданий, толстостенных сооружений и других сложных строительных конструкций. Отличительными особенностями бетатрона являются малая масса и возможность ручной транспортировки к объекту контроля.

Допустимые условия эксплуатации:

- температура окружающей среды от минус 20 до +40 °С;
- относительная влажность воздуха до 80 % при температуре 25 °С;
- атмосферное давление $101,1 \pm 4,0$ кПа (760 ± 30 мм рт. ст.).

2.2.2. Состав

В состав бетатрона входят:

- излучатель – 1 шт.;
- блок питания и управления – 1 шт.;
- пульт управления – 1 шт.;
- выносной блок дозиметра – 1 шт.;
- блок световой сигнализации – 1 шт.;
- сетевой кабель питания – 1 шт.;
- кабель управления № 1, соединяет пульт управления с блоком питания и управления – 1 шт.;
- кабель силовой, соединяет блок питания и управления с излучателем – 1 шт.;
- кабель управления № 2, соединяет блок питания и управления с излучателем – 1 шт.;
- кабель для соединения блока питания и управления с выносным блоком дозиметра – 1 шт.;
- кабель для соединения блока световой сигнализации с блоком питания и управления – 1 шт.;
- запасные высоковольтные блоки – 2 шт.;
- руководство по эксплуатации – 1 экз.

2.2.3. Технические данные

1. Максимальная энергия ускоренных электронов, не менее 6,0 МэВ.
2. Диапазон регулировки энергии ускоренных электронов с шагом 0,1 МэВ (2,0...6,0) МэВ.
3. Мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени при максимальной энергии на частоте 200 Гц, не менее 3Р/мин ($26,3 \times 10^{-3}$ Гр/мин).
4. Максимальные размеры фокусного пятна 0,2 × 3 мм.
5. Максимальная потребляемая мощность из сети переменного тока частотой 50 Гц, при напряжении 220 В с допускаемыми отклонениями от номинальной величины $\pm 10\%$, не более 2,3 кВт.
6. Время работы – не менее 10 часов в сутки с циклом: 45 мин работа – 15 мин перерыв при включенных вентиляторах.
7. Габаритные размеры блоков, мм:
 - излучатель (без подставки): 600 × 450 × 250;
 - блок питания и управления: 600 × 400 × 500;
 - пульт управления: 150 × 200 × 50;
 - выносной блок дозиметра: 75 × 55 × 30;
 - блок световой сигнализации: 380 × 165 × 160.
8. Масса блоков бетатрона, не более, кг:
 - излучатель (с подставкой): 100;
 - блок питания и управления: 80;
 - пульт управления: 1;
 - выносной блок дозиметра: 0,5;
 - блок световой сигнализации: 3.
9. Длина соединительных кабелей, м:
 - пульт управления – блок питания и управления: 25;
 - излучатель – блок питания и управления: 5;
 - блок питания и управления – излучатель (управление): 5;
 - выносной блок дозиметра – блок питания и управления: 15;
 - блок световой сигнализации – блок питания и управления: 5.
 - сетевой кабель питания: 3–5.

2.2.4. Устройство и работа бетатрона

Бетатрон является источником тормозного излучения с непрерывным энергетическим спектром, возникающим в результате преобразования кинетической энергии электронов при торможении в мишени, выполненной из материала с высоким атомным номером.

Бетатрон относится к классу циклических ускорителей, в которых электроны двигаются в вакуумной ускорительной камере по круговой

траектории, приобретая необходимую энергию за счет вихревого электрического поля. Вихревое поле создается импульсным магнитным потоком, часть которого используется для управления движением электронов.

Бетатрон состоит из отдельных блоков: излучателя, блока питания и управления, пульта управления и выносного блока дозиметра. Дополнительно бетатрон комплектуется блоком световой сигнализации, состоящим из желтой и красной ламп вспышек, и сирены.

Импульсное магнитное поле с требуемыми характеристиками создается электромагнитом бетатрона (рис. 2.2.1), содержащим магнитопровод с полюсами 3, набор центральных вкладышей 1 и намагничивающую обмотку 4.

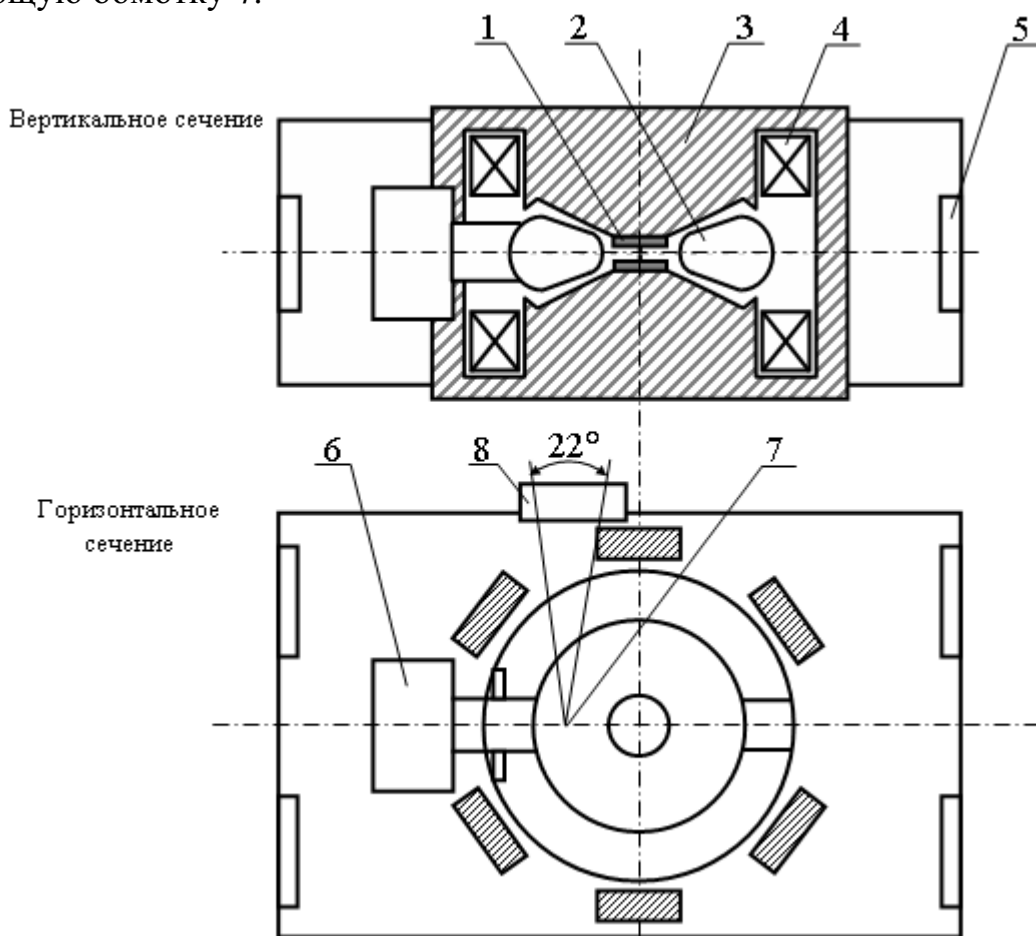


Рис. 2.2.1. Излучатель бетатрона МИБ-6:

1 – центральные вкладыши; 2 – ускорительная камера; 3 – электромагнит; 4 – обмотка электромагнита; 5 – вентилятор; 6 – высоковольтный блок инжекции; 7 – мишень; 8 – монитор излучения

Ускорительная камера 2, входящая в высоковольтный блок инжекции 6, установлена между полюсами электромагнита. Она соединена с высоковольтным блоком инжекции 6 герметичным масляным переходом.

Временные диаграммы импульсов токов и напряжений при работе бетатрона показаны на рис. 2.2.2.

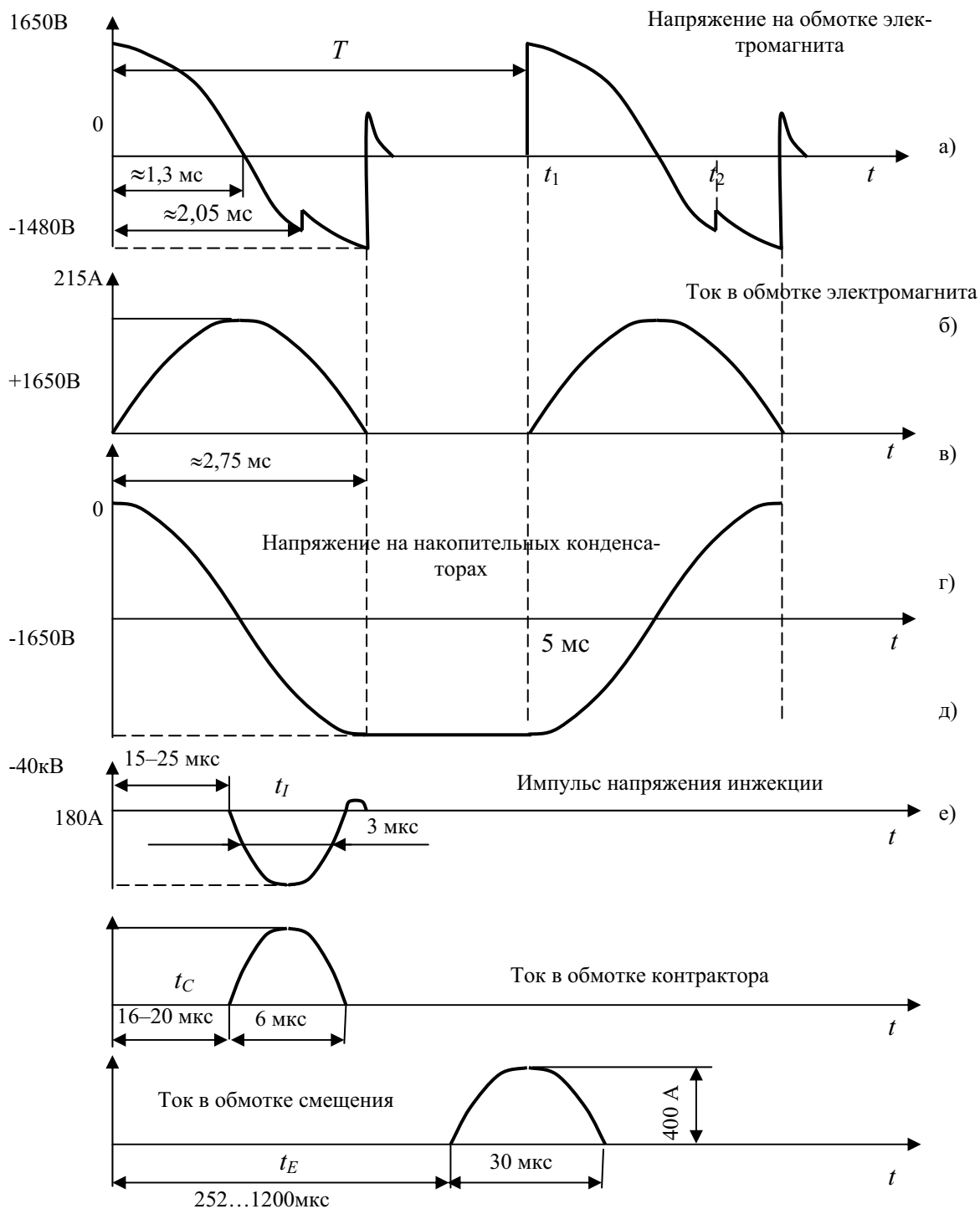


Рис. 2.2.2. Временные диаграммы импульсов токов и напряжений

Форма импульса напряжения на намагничивающей обмотке представлена на рис. 2.2.2, а, а ток через обмотку показан на рис. 2.2.2, б.

Ток электромагнита представляет собой полусинусоиды с периодом повторения 5 мс и скважностью, примерно равной 2. Напряжения на намагничивающей обмотке и любой другой обмотке, охватывающей полюса электромагнита, имеют форму отрезков косинусоид. В промежуток времени от t_1 до t_2 осуществляется свободный разряд накопительной конденсаторной батареи на обмотку электромагнита (рис. 2.2.2, в). От момента t_2 до момента, когда ток электромагнита спадет до нуля, он протекает через фильтровую батарею, отбирая от нее энергию для компенсации потерь во всех элементах колебательного контура. Устройство, формирующее эти напряжения и токи, далее называется силовым конвертором.

Электроны вводятся в область ускорения с помощью электронной пушки с термоэмиссионным катодом. Предварительно ускоренные до энергии 40 кэВ электроны инжектируются в область равновесной орбиты в момент времени t_1 (рис. 2.2.2, г), когда значение величины магнитного поля обеспечивает движение электронов по окружностям вблизи равновесной орбиты. Под действием вихревого электрического поля и магнитного управляющего поля электроны захватываются в ускорение. При движении по круговой траектории энергия электронов с каждым оборотом увеличивается. Ускорение происходит до тех пор, пока магнитный поток (ток намагничивающей обмотки) возрастает. Энергия ускоренных электронов в бетатроне пропорциональна радиусу равновесной орбиты и напряженности магнитного поля на этом радиусе.

Для повышения мощности дозы в бетатроне установлен контрактор, представляющий собой специальную обмотку, уложенную на полюсных наконечниках. Импульс тока контрактора в момент времени t_C (рис. 2.2.2, д) создает дополнительное импульсное магнитное поле, которое изменяет мгновенное положение равновесной орбиты и топографию управляющего магнитного поля в рабочем зазоре бетатрона. Это приводит к тому, что эффективность захвата электронов в ускорение повышается, и, соответственно, возрастает мощность дозы тормозного излучения.

В момент времени t_E (рис. 2.2.2, е), при достижении максимума поля, в отдельную обмотку смещения подается импульс тока, вызывающий увеличение радиуса движения электронов. Электроны, двигаясь по разворачивающейся спирали, попадают на танталовую мишень, установленную на аноде электронной пушки. При торможении ускоренных электронов в мишени кинетическая энергия электронов преобразуется в тормозное излучение, выходящее из мишени в направлении движения электронов.

В данном бетатроне энергия ускоренных электронов за счет регулировки времени смещения t_e может меняться от 2,0 до 6,0 МэВ с шагом 0,1 МэВ.

Мощность дозы тормозного излучения контролируется монитором излучения, выполненным на основе ионизационной камеры, установленной в излучателе.

Бетатрон оснащен двумя дозиметрами, встроенным и выносным, контролирующими дозу излучения при радиографии перед и за контролируемым объектом. Детекторами излучения для обоих дозиметров являются ионизационные камеры.

Бетатрон оснащен таймером для задания времени экспозиции.

Отключение бетатрона осуществляется либо вручную, либо при наборе дозиметрами заданных доз или истечении заданного времени экспозиции. Задание доз и времени экспозиции, а также параметра, по которому осуществляется отключение, производится с помощью клавиатуры.

В бетатроне предусмотрены: защита от перенапряжений и токовых перегрузок в силовом конверторе; защита от перегрева излучателя и блока питания и управления; защитная блокировка для обеспечения радиационной безопасности.

Для обеспечения требований по радиационной безопасности бетатрон комплектуется блоком световой и звуковой сигнализации, состоящим из желтой и красной ламп-вспышек и сирены.

2.2.5. Устройство и работа составных частей

1. Излучатель

Излучатель (см. рис. 2.2.1) содержит электромагнит, высоковольтный блок инъекции, генератор напряжения инъекции, генераторы тока смещения и тока контрактора, терморезистор и вентиляторы для принудительного охлаждения электромагнита и элементов импульсных схем.

Электромагнит разделен на две одинаковые половины, которые в рабочем состоянии соединяются между собой. Он состоит из обратного магнитопровода, центральных вкладышей, полюсов и намагничивающей обмотки. Магнитопровод имеет шестистоечную конструкцию. Его элементы набраны из пластин ферромагнитного материала и запрессованы в дюралюминиевый корпус.

Центральные вкладыши имеют цилиндрическую форму и для достижения максимального коэффициента заполнения выполнены из параллельно расположенных пластин.

Намагничивающая обмотка состоит из двух одинаковых секций, соединенных между собой последовательно и согласно. На поверхности полюсов расположены обмотки смещения и контрактора соответственно.

Питание генераторов напряжения инъекции, генератора тока смещения и генератора тока контрактора осуществляется от обмотки, рас-

положенной в электромагните. Электромагнит содержит обмотку обратной связи, напряжение которой используется для синхронизации работы отдельных узлов бетатрона и стабилизации амплитуды напряжения на электромагните.

Высоковольтный блок инжекции (рис. 2.2.3) содержит импульсный трансформатор $T2$ с выводами 1, 2, трансформатор напряжения накала катода $T3$ с выводами 1, 4, расположенными в металлическом корпусе 3, и стеклянную ускорительную камеру 11. Металлический корпус 3 соединяется с ускорительной камерой маслonaполненным переходом 5. Корпус 3 герметизирован и заполнен трансформаторным маслом.

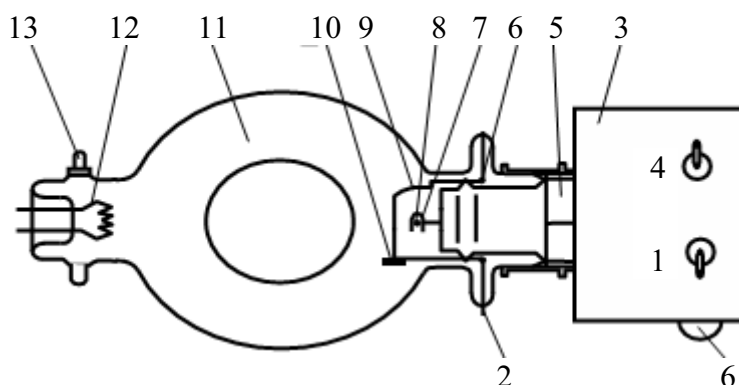


Рис. 2.2.3. Высоковольтный блок инжекции:

- 1 – вывод «общий»; 2 – вывод «первичное напряжение инжекции»;
 3 – корпус; 4 – вывод «накал катода»; 5 – маслonaполненный переход;
 6 – вывод анода; 7 – фокусирующий электрод; 8 – катод; 9 – анод;
 10 – мишень (тантал $0,6 \times 1,3 \times 10$ мм); 11 – ускорительная камера;
 12 – геттер; 13 – вывод проводящего слоя

Ускорительная камера 11 состоит из стеклянного баллона с внутренним проводящим слоем с выводом 13, инжекторного устройства, содержащего катод 8, анод 9 с выводами 6 анода, фокусирующий электрод 7 и мишень 10. В ускорительной камере смонтирован газопоглотитель 12. Катод инжектора питается напряжением 3...5 В от обмотки трансформатора $T3$. В момент инжекции на катод подается импульс отрицательного напряжения амплитудой около 40 кВ от импульсного трансформатора $T2$.

Выводы проводящего слоя 13 и анода 6 заземлены, что необходимо для измерения тока инжекции и контроля работы генератора напряжения инжекции и ускорительной камеры.

2. Блок питания и управления

Внешний вид блока питания и управления показан на рис. 2.2.4. Элементы связи с другими блоками, включения сети и подключения блокировки расположены на двух панелях: панели подключения разъемов и панели управления.

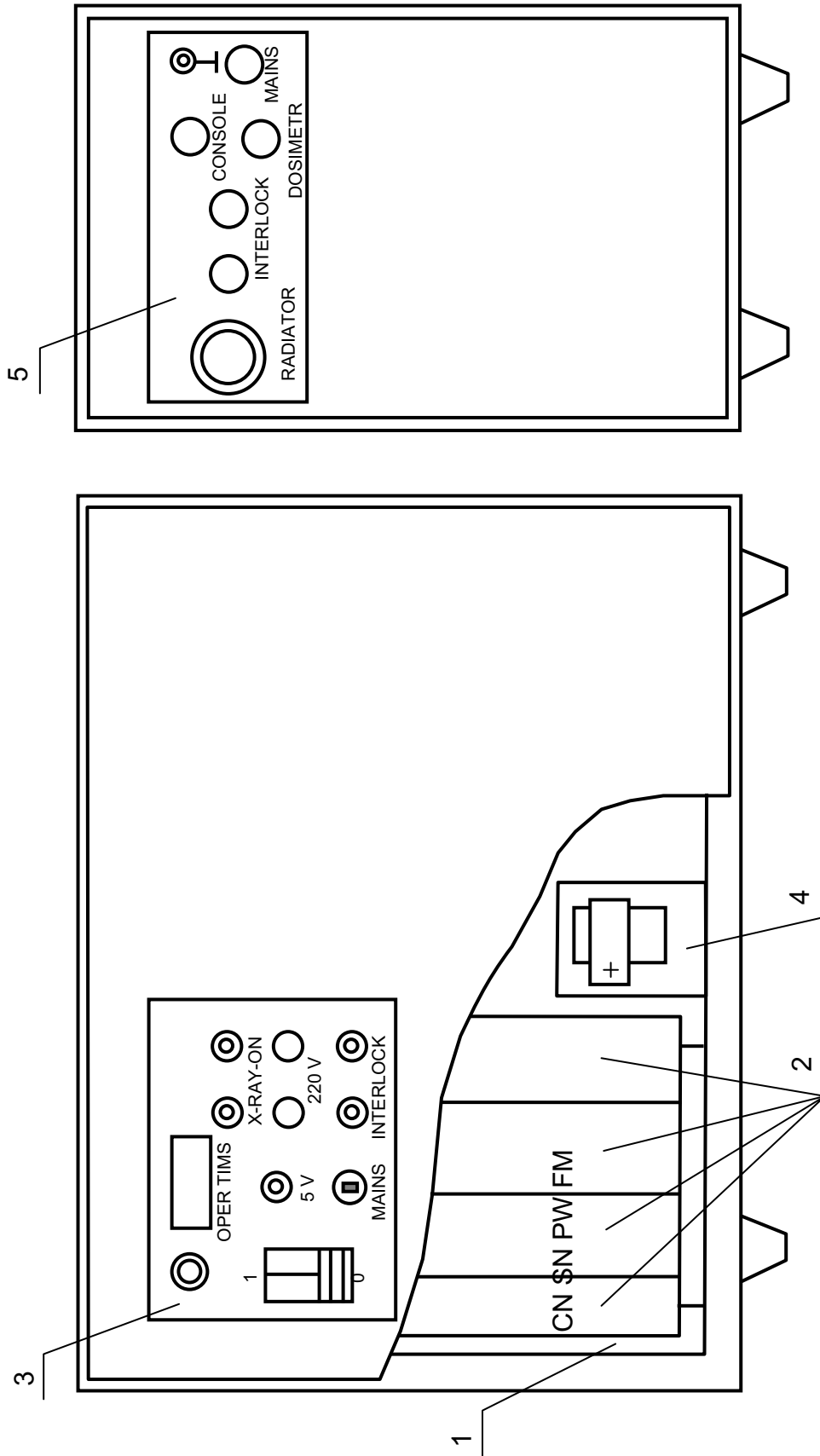


Рис. 2.2.4. Блок питания и управления:

1 – корзина; 2 – печатные платы; 3 – панель управления; 4 – трансформатор блока управления;
5 – панель разъемов

К панели разъемов подсоединяются два пятиметровых кабеля от излучателя – силовой и управления, кабель для подключения пульта управления длиной 25 м, кабель для подключения детектора выносного дозиметра длиной 15 м, кабель подключения к питающей сети длиной 5 м и кабель блока радиационной безопасности длиной 5 м.

На панели управления расположены автоматический выключатель силового конвертора и замковый выключатель сети блока управления MAINS с контрольными лампами включенного состояния; сетевые предохранители блока управления, клеммы для подключения внешней блокировки, клеммы +24 V для подключения светового транспаранта (устройств радиационной безопасности, ток нагрузки не более 0,2 А), счетчик времени наработки.

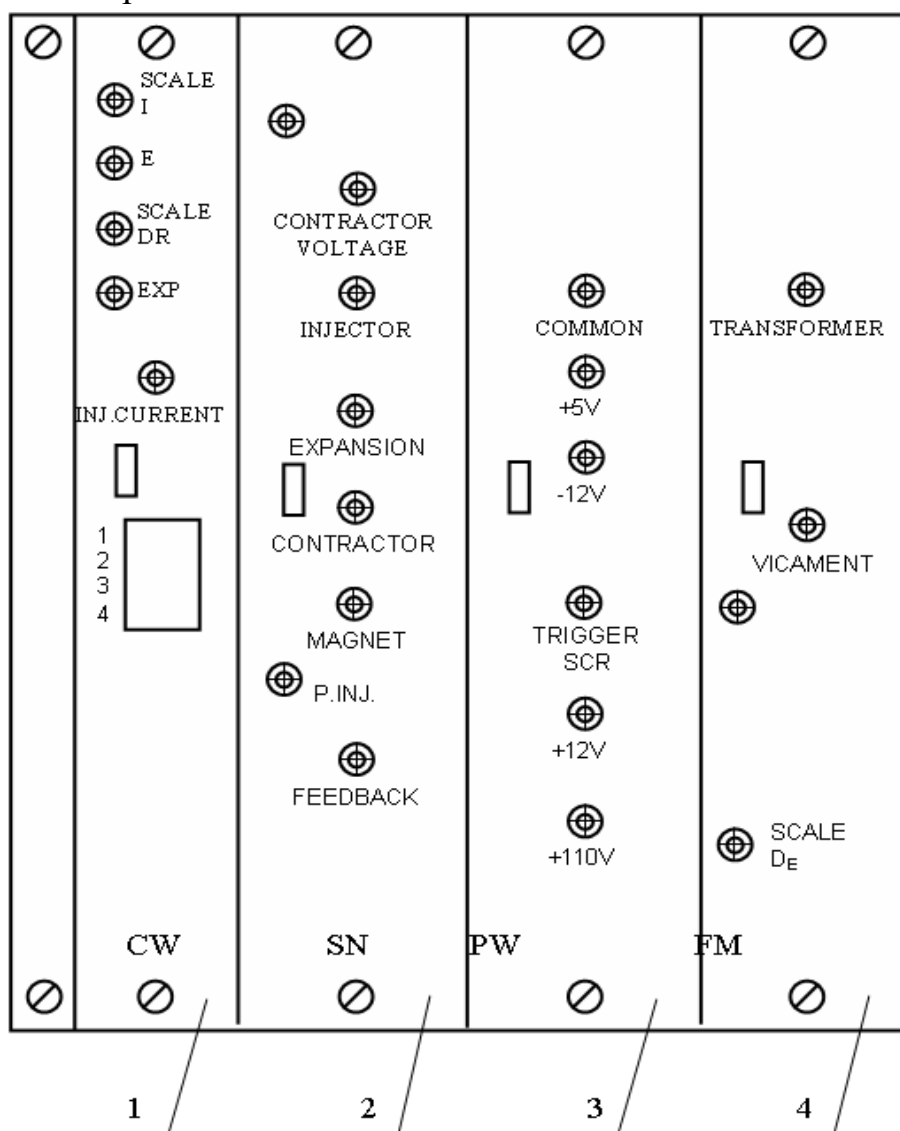


Рис. 2.2.5. Блок управления. Размещение печатных плат, контрольных гнезд и основных регулировок: 1 – блок контроллера; 2 – блок синхронизации; 3 – блок питающих напряжений; 4 – блок стабилизатора накала

Блок управления состоит из четырех печатных плат: В1 (блок питающих напряжений); В2 (блок синхронизации); В3 (блок стабилизатора накала); В4 (блок контроллера), конструктивно объединенных в корзине (рис. 2.2.5).

На панель блока выведены следующие контрольные сигналы: напряжение с обмотки обратной связи – FEEDBACK; импульсы запуска силового конвертора – MAGNET, импульсы запуска систем бетатрона – контрактора – CONTRACTOR, смещения – EXPANSION, инъекции – INJECTOR.

Внешний вид пульта управления приведен на рис. 2.2.6. На панели пульта установлены основные элементы индикации и управления.

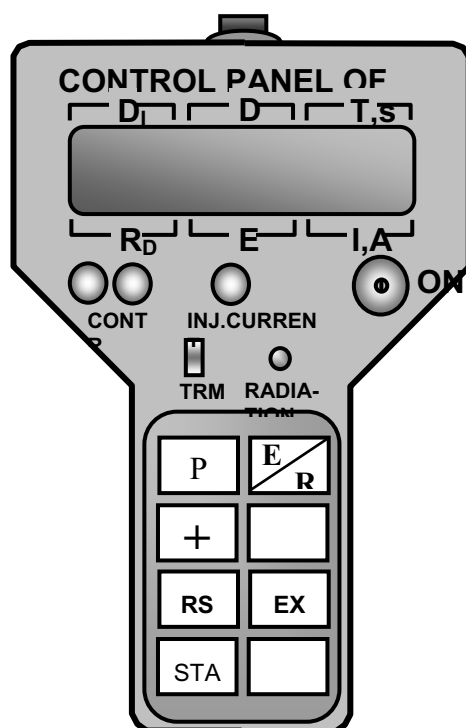


Рис. 2.2.6. Пульт управления бетатрона МИБ-6

К ним относятся:

- жидкокристаллический дисплей, на котором отображаются заданные и текущие параметры работы бетатрона;
- ключ безопасности SA2, который разрешает включение излучения;
- клавиатура SB1, с помощью которой задаются требуемые параметры работы и осуществляется управление бетатроном;
- движковый переключатель для аварийного отключения управляемого выпрямителя в блоке питания и управления SA1 –TRM (АВ. ОТКЛ);
- светодиод RADIATION, индицирующий включение излучения;

- резистор INJ. CURRENT для установки и регулирования величины тока инъекции;
- резистор и гнездо CONTR для установки управляющего напряжения контрактора. Этим резистором следует пользоваться только после смены ускорительной камеры, если значение управляющего напряжения для устанавливаемой камеры отлично от значения для предыдущей камеры.

На жидкокристаллическом дисплее отображаются, а с помощью клавиатуры устанавливаются следующие параметры:

- D_i – доза излучения, набираемая встроенным монитором излучения, ионизационная камера которого установлена в выходном окне излучателя;
- D_e – доза излучения, набираемая внешним дозиметром, ионизационная камера которого устанавливается за контролируемым изделием;
- T – время экспозиции в секундах;
- E – энергия ускоренных электронов в МэВ;
- R_D – мощность экспозиционной дозы излучения, измеряемая ионизационной камерой в выходном окне блока излучателя и пересчитанная на расстояние 1 м от мишени ускорителя.

Кроме этого, дисплей индицирует амплитуду импульса тока инъекции в амперах в режиме включенного излучения и значение установленного тока – в режиме выключенного излучения.

Пульт управления содержит также зуммер, подающий звуковой сигнал при возникновении неисправности в работе ускорителя.

Клавиатура содержит 8 клавиш. Клавиша P служит для выбора вводимого параметра – D_i (дозы по встроенному дозиметру), D_e (дозы по выносному дозиметру) и T (времени экспозиции).

Диапазон устанавливаемых доз D_i , пересчитанных на расстояние 1 м от мишени, составляет 0,1...999,9 P.

Диапазон устанавливаемых доз D_e составляет 0,01...9,99 P.

Время экспозиции T может устанавливаться в диапазоне 1...9999 с.

Клавиша EXP. служит для установки параметра, по которому осуществляется запланированное отключение бетатрона. Запланированное отключение можно производить по одному, двум или по всем трем параметрам. В этом случае отключение осуществится по тому параметру, который достигнет установленного значения первым. Возможна работа также без установки параметров. В этом случае отключение бетатрона осуществляется клавишей STOP.

Клавиша RST предназначена для перезапуска контроллера в режим поиска максимума мощности дозы. Клавиши «+» и «минус» служат для установки значений вводимых параметров. Клавиши START и STOP служат для включения и отключения излучения.

Клавиша E/R имеет двойное назначение. С ее помощью устанавливается энергия ускоренных электронов и задается требуемая мощность дозы. Оператор определяет назначение этой клавиши в данный момент по тому месту, где находится мигающий курсор дисплея. Каждое последующее нажатие этой клавиши меняет ее функциональное назначение. Диапазон допустимых значений энергий ускоренных электронов лежит в пределах от 2,5 до 6–200 МэВ. Дискретность установки энергии составляет 0,1 МэВ.

Установленная мощность дозы должна находиться в пределах от 0,5 до 7,0 Р/мин. и меняться с шагом 0,1 Р/мин. Если будет установлено значение мощности больше, чем максимально возможное для данного типа бетатрона, то контроллер найдет и будет поддерживать максимально возможную в данных условиях мощность дозы излучения. Контроллер может быть сразу переведен в режим поиска и поддержания максимума излучения, если ввести значение мощности дозы, условно равное показанию «МАХ» на экране дисплея.

Электрическая схема выносного пульта приведена во второй части «Технического описания бетатрона» (рис. 2.7.1), а схема размещения элементов – на рис. 2.7.2.

Схема пульта построена на основе однокристалльного компьютера 89C51 с внутренней памятью программ. Связь с контроллером В4 блока питания и управления осуществляется через транзисторный оптрон U1.

2.2.6. Указание мер безопасности

1. Эксплуатация бетатрона должна осуществляться в соответствии с национальными Нормами и Правилами для источников рентгеновского излучения с максимальной энергией фотонов до 10 МэВ.

2. Защита от тормозного излучения осуществляется удалением оператора от мишени в обратном направлении от прямого пучка на максимально возможное расстояние и установкой защитных экранов.

3. Распределения мощности дозы вокруг излучателя в горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены в табл. 1 и 2 и на поясняющем рис. 2.2.7.

4. Толщина защитного экрана рассчитывается для каждого конкретного случая, в зависимости от требуемой кратности ослабления и применяемого материала экрана.

5. При работе с бетатроном в помещении необходимо предусмотреть приточно-вытяжную вентиляцию.

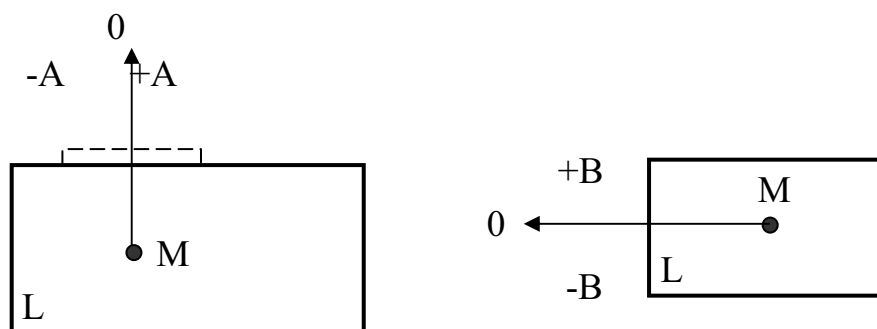


Рис. 2.2.7. Распределение мощности дозы вокруг излучателя

Таблица 2.2.1

Распределение в медианной плоскости

Угол А, град.	Мощность дозы (отн. ед.)	Угол А, град.	Интенсивность
0	1	190	0,048
5	0,787	200	0,067
10	0,515	210	0,053
15	0,27	220	0,033
20	0,15	230	0,022
30	0,1	240	0,027
40	0,12	250	0,025
50	0,1	260	0,027
60	0,072	270	0,027
70	0,028	280	0,03
80	0,03	290	0,058
90	0,037	300	0,075
100	0,053	310	0,062
110	0,048	320	0,083
120	0,023	330	0,13
130	0,028	335	0,16
140	0,033	340	0,287
150	0,03	345	0,46
160	0,032	350	0,56
170	0,032	355	0,72
180	0,043		

Таблица 2.2.2

Распределение в вертикальной плоскости

Угол А, град.	Мощность дозы (отн. ед.)	Угол А, град.	Мощность дозы (отн. ед.)
-10	0,614	50	0,054
-5	0,81	60	0,039
-2,5	0,92	70	0,038
0	1	80	0,03
2,5	0,98	90	0,035

Угол А, град.	Мощность дозы (отн. ед.)	Угол А, град.	Мощность дозы (отн. ед.)
5	0,87	100	0,028
7,5	0,746	110	0,023
10	0,605	120	0,019
12,5	0,518	130	0,023
15	0,35	140	0,02
17,5	0,23	150	0,03
20	0,209	160	0,04
30	0,13	170	0,053
40	0,079	180	0,04

6. До включения бетатрона дежурный оператор должен убедиться в отсутствии людей в радиационно-опасной зоне.

7. При работе бетатрона строго запрещается входить в радиационно-опасную зону или помещение, где установлен излучатель.

8. Все работающие на бетатроне должны иметь индивидуальные дозиметры.

9. Бетатрон представляет собой высоковольтную установку, при обслуживании которой следует руководствоваться требованиями инструкции по технике безопасности при работе с высоковольтными установками.

2.2.7. Подготовка к работе и работа

1. После транспортирования бетатрона, а также перед работой необходимо проверить исправность блоков внешним осмотром.

2. Установить излучатель на подставку и соединить все блоки установки соединительными кабелями.

3. Установить на блоке питания и управления автоматический выключатель и замковый выключатель MAINS блока управления в выключенное положение.

4. Подсоединить к клеммам INTERLOCK на контрольной панели блока питания и управления внешнюю блокировку, а при отсутствии ее соединить клеммы между собой.

5. Установить движковый переключатель аварийного отключения пульта в рабочее положение (положение, противоположное надписи TRM).

6. Подсоединить к блоку питания и управления детектор выносного дозиметра (при необходимости работы с выносным дозиметром).

7. Подсоединить сетевой кабель к сети и перевести выключатель MAINS и автоматический выключатель блока питания и управления во включенное положение (ON).

8. Вставить ключ в замок пульта и перевести его в положение ON.

После перечисленных операций загорятся светодиод +5В и контрольная лампа автоматического выключателя на панели управления и заработают вентиляторы в блоке питания и управления и в излучателе, а на дисплее выносного пульта периодически появляется сообщение – «Link is absent». Это сообщение будет выдаваться в течение шести секунд, пока происходит первоначальный заряд контурных конденсаторов. Если связь между процессорами блока питания и выносного пульта по какой-либо причине отсутствует, то сообщение «Link is absent» будет повторяться и после первых 6 секунд.

Если связь нормальная, на экране пульта управления появится следующая информация:

D _I	D _E	T,с
000.0	0.00	0000
MAX 7.5 0.55		

R_D E I₁, A

9. После транспортирования при первом включении следует проверить по звуку исправную работу всех вентиляторов блока питания и излучателя и по наличию потока воздуха в выходных отверстиях блока.

10. Установить переменным резистором INJ.CURRENT пульта управления значение тока инжекции, указанного в сертификате на данную ускорительную камеру. При отправке ток инжекции выставлен для камеры, находящейся в излучателе (например, 0,55).

11. Если требуется запланированное отключение излучения, ввести требуемые параметры с помощью клавиатуры. При выполнении этой операции необходимо знать, что ввод начинается с нажатия функциональной клавиши выбора параметра P.

При этом на дисплее рядом с соответствующей надписью D_I, D_E, T индицируется символ '<'. Затем с помощью клавиш «+» и «-» набирается значение параметра. Порядок ввода не играет роли. При кратковременном нажатии клавиш «+» и «-» значение параметра изменяется на одну единицу.

Если клавишу удерживать в нажатом состоянии, будет осуществляться более быстрое непрерывное изменение параметра.

Набор чисел возможен только тогда, когда излучение выключено.

Для выбора параметра, по которому осуществляется отключение, необходимо выбрать функциональной клавишей P параметр, а затем нажать клавишу OFF, при этом через каждые 4 с, при работе в режиме излучения, на дисплее будет появляться заданное значение параметра в течение 1 с, в остальное время индикатор будет показывать текущее значение параметра.

12. Если требуется изменение энергии электронов E , ввести новое значение энергии при помощи клавиатуры. Для этого следует нажать клавишу E/R. Оператор определяет назначение этой клавиши в данный момент по тому месту, где находится мигающий курсор дисплея. Каждое последующее нажатие этой клавиши меняет ее функциональное назначение. Затем с помощью клавиш «+» и «-» набрать значение энергии.

13. Если требуется работа при установленном уровне мощности дозы P , необходимо ввести значение уровня мощности дозы клавишами E/R, «+» и «-». Диапазон значений этого параметра составляет от 0,5 до 7 P/м.мин. При установке значений 000 или более 7 контроллер работает в режиме поиска максимума дозы.

14. После этих подготовительных операций нажать клавишу START.

Содержание экрана дисплея примет вид:

DELAY TIME 05s $U_c = 3,5 \text{ V}$

В первой строке дисплея указывается время задержки до момента включения излучения. Во второй строке индицируется управляющее напряжение контрактора (например, 3,5 В).

В течение времени задержки должна работать сирена, установленная в блоке питания и управления. Если подключен блок радиационной безопасности, то в течение времени задержки будет работать и желтая лампа-вспышка. Затем выключатся сирена и желтая лампа – вспышка и включится красная лампа – вспышка.

По истечении 5с задержки появится звук электромагнита, верхняя строка дисплея примет вид с установленными значениями. После этого необходимо понаблюдать за работой контроллера и выходом бетатрона на максимум излучения. В течение первых 3 с после включения, пока производится разгон напряжения контура магнита излучателя бетатрона, контроллер находится в режиме ожидания. Значение мощности дозы R_D может медленно меняться. Далее контроллер входит в режим поиска, что видно по колебаниям показаний мощности дозы. Время поиска и амплитуда колебаний зависят от ряда факторов. При сильной расстройке бетатрона или выхода энергонезависимой памяти из строя, поиск происходит в широкой зоне, и показания изменяются от нуля до максимальных («грубый» поиск).

После этого контроллер переходит в режим слежения, когда излучение близко к максимальному значению, а показания колеблются в пределах 1–3 отсчетов, что практически соответствует естественным флуктуациям, которые имеют место при ручном управлении.

Переход в режим грубого поиска может иметь место не только после включения, но и в процессе работы бетатрона при очень больших колебаниях напряжения питающей сети.

Перевести контроллер в режим грубого поиска можно нажатием клавиши RST и кратковременным ее удержанием до момента уменьшения показаний мощности дозы до нуля.

15. Контроль тока инъекции осуществляется по показаниям дисплея. Значение оптимального тока инъекции, указанное в данных на ускорительную камеру, устанавливается переменным резистором, установленным под шлиц на пульте управления. Если этой регулировки недостаточно, то контроллер даст дополнительное сообщение (см. п. 10.18). Рекомендуется после изменения тока инъекции нажимать клавишу RST для процедуры полного поиска максимума мощности дозы.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации, по мере выработки ресурса камеры и других элементов, оптимальное значение тока инъекции и максимальной мощности дозы может измениться, но эти изменения не должны быть большими. Большие отклонения будут свидетельствовать о неисправной работе бетатрона.

16. После набора заданного значения параметра, по которому осуществляется отключение бетатрона, электромагнит отключится, и зуммер пульта управления начнет издавать пульсирующий звуковой сигнал.

Для возврата в исходное состояние необходимо нажать клавишу STOP.

17. При кратковременных перерывах в работе на бетатроне, выключатель MAINS и автоматический выключатель на контрольной панели блока питания и управления рекомендуется оставлять включенными для более эффективного охлаждения блоков бетатрона. При длительных перерывах в работе – более 1–2 ч – выключатель MAINS и автоматический выключатель необходимо отключать. После окончания смены в дополнение к этому необходимо отсоединять сетевую вилку.

Выключатель аварийного отключения TRM на выносном пульте используется тогда, когда программа процессора работает неправильно, и кнопкой STOP невозможно отключить излучение.

В этом случае излучение отключается выключателем TRM. При этом электромагнит перестанет возбуждаться, а на дисплее исчезнут показания тока инъекции.

Необходимо всегда помнить, что последующее включение ускорителя переводом ползунка выключателя TRM в рабочее положение может привести к аварийному режиму. Поэтому после отключения электромагнита выключателем TRM следует полностью отключить ускоритель от сети, выключив автоматический выключатель и замковый вы-

ключатель на блоке питания и управления. Затем необходимо перевести ползунок выключателя (switcher) TRM в нижнее положение и повторить операции включения ускорителя.

В процессе работы бетатрона в редких случаях проявляются сбои в выполнении программы процессора. Это приводит к изменению режима или к отключению излучения. В этом случае необходимо отключить замковый выключатель сети и через 30–40 с снова включить его.

В процессе работы возможны нестандартные ситуации, при проявлении которых происходит автоматическое отключение излучения, на экране дисплея в верхней строке появляется сообщение, и зуммером пульта управления подается непрерывный звуковой сигнал.

18. Установка оптимального тока инъекции и диапазона регулировки тока инъекции.

Оптимальный ток инъекции – это такой ток инжектируемых электронов, при котором в ускорение захватывается наибольшее их количество и, следовательно, при прочих равных условиях мощность дозы излучения максимальна. В процессе длительной работы возможно изменение в небольших пределах величины оптимального тока. Поэтому, если в процессе эксплуатации мощность дозы немного уменьшилась по сравнению с той, что была ранее (кратковременное возможное уменьшение мощности дозы через несколько минут после включения не следует принимать во внимание), можно попытаться подстроить ток инъекции.

19. Для подстройки тока инъекции необходимо:

- включить бетатрон на излучение;
- дать поработать бетатрону 2–3 минуты;
- зафиксировать величину тока инъекции и максимальную мощность дозы;
- увеличить ток инъекции на 1–2 единицы, понаблюдав за величиной мощности дозы в течение 30–40 с;
- если результат оказался положительным, следует дальше увеличить ток, если мощность дозы уменьшилась, следует вернуться назад и двигаться в сторону меньших токов.

Установив, таким образом, зависимость мощности дозы от тока инъекции в нескольких точках, можно найти оптимальный ток и далее устанавливать именно эту величину тока инъекции.

2.2.8. Указания по просвечиванию

1. Радиационный неразрушающий контроль с применением бетатрона МИБ-6 должен производиться в соответствии с общими положениями, методикой и требованиями радиографии на базе ускорителей заряженных частиц. Следует также руководствоваться дополнительными требованиями, определенными конкретной технологией контроля.

2. Бетатрон МИБ-6 рекомендуется для проведения радиографического контроля сварных соединений и литья с эквивалентной толщиной по стали от 50 до 200 мм, а также строительных конструкций из бетона и других материалов толщиной от 200 до 900 мм. Значение предельной толщины ограничивается большим временем экспозиции и для стали равно 300 мм; для бетона – 1200 мм.

3. Проникающая способность тормозного излучения характеризуется слоем половинного ослабления. Знание слоя половинного ослабления позволяет определить время экспозиции при различных толщинах просвечиваемого материала, если это время известно для одной толщины. Такой расчет является приближенным, так как слой половинного ослабления для источников излучения на основе ускорителей сложным образом зависит от самой толщины. Усредненное значение толщины слоя половинного ослабления для бетатрона МИБ-6 составляет для стали – 32 мм, алюминия и его сплавов – 100 мм, бетона (плотность $2,35 \text{ т/м}^3$) – 110 мм.

4. При радиографии важной характеристикой источника является размер поля облучения. Размер поля облучения в бетатроне определяется не только физическими процессами взаимодействия электронов с материалом мишени, но и элементами конструкции бетатрона.

В бетатроне МИБ-6 размер поля облучения равен (240×240) мм при фокусном расстоянии 1 м. Выравнивающие фильтры, улучшающие равномерность поля излучения, как правило, в бетатроне МИБ-6 не требуются.

С увеличением фокусного расстояния увеличивается размер снимка и улучшается выявляемость дефектов, но возрастает время экспозиции. В соответствии с нормативными документами увеличение изображения дефекта, находящегося на передней грани просвечиваемого изделия, не должно превышать 25 %. Таким образом, фокусное расстояние не должно быть меньше пятикратной толщины просвечиваемого изделия.

5. При радиографии материалов и изделий с помощью бетатрона основные показатели радиационного контроля – чувствительность и производительность – в значительной степени определяются чувствительностью и контрастностью эмульсии рентгеновских пленок, а также типом усиливающих экранов. Усиливающее действие металлических экранов основано на дополнительном воздействии на пленку электро-

нов, выбиваемых из экранов фотонами. Кроме того, металлические экраны могут несколько улучшить качество изображения, ослабляя (фильтруя) преимущественно рассеянное фоновое излучение.

Материалом экранов служат тяжелые металлы (свинец, вольфрам, олово, тантал и др.). Усиливающее действие металлических экранов зависит от толщины переднего и заднего экранов, энергии излучения, чистоты обработки экранов и ряда других факторов.

6. Для контрольных просвечиваний на бетатроне МИБ-6 используются усиливающие экраны из свинца: толщина переднего экрана составляет 0,5 мм; заднего – 1,0 мм. Схема зарядки кассет для просвечивания обозначается при этом таким образом: 0,5 П 1,0. Эти же экраны могут быть рекомендованы для первых просвечиваний у потребителя. Как правило, в дальнейшем потребитель сам подбирает для своих конкретных условий материал и толщину экрана с точки зрения максимального эффекта усиления и наилучшей выявляемости.

7. Сократить время просвечивания путем усиления фотографического эффекта позволяет экспонирование пленки с флюоресцирующими экранами, однако, вследствие значительного рассеяния свечения люминофора и большой зернистости флюоресцирующих экранов, четкость изображения дефектов на рентгенограмме оказывается значительно хуже, чем при экспонировании пленки с металлическими экранами.

В практике бетатронной радиографии флюоресцирующие экраны почти всегда применяются в комбинации с металлическими экранами, позволяющими значительно уменьшить долю рассеянного излучения, воздействующего на флюоресцирующие экраны (и частично на пленку) и приводящего к дополнительному размытию изображения дефектов.

8. При просвечивании ответственных конструкций рекомендуется применять мелкозернистые рентгеновские пленки D4 (Бельгия), F и J4200 (Япония), Kodak MX-5 (Великобритания), РТ-4М (Россия), с зарядкой их в кассеты с металлическими усиливающими экранами. В тех случаях, когда требования к выявляемости дефектов могут быть удовлетворены с использованием чувствительных пленок Д7 (Бельгия), Kodak AX5, CX (Великобритания), РТ-1 (Россия), допускается их применение с зарядкой в кассеты с металлическими усиливающими экранами.

9. Экспозиция при просвечивании изделий может быть осуществлена с помощью таймера, а также встроенного или выносного дозиметров.

В первом случае необходимо использовать графики экспозиции. Такие графики для изделий из стали и бетона приведены на рис. 2.2.8, 2.2.9. Время экспозиции при контроле изделий из других материалов может быть определено путем получения пробных снимков.

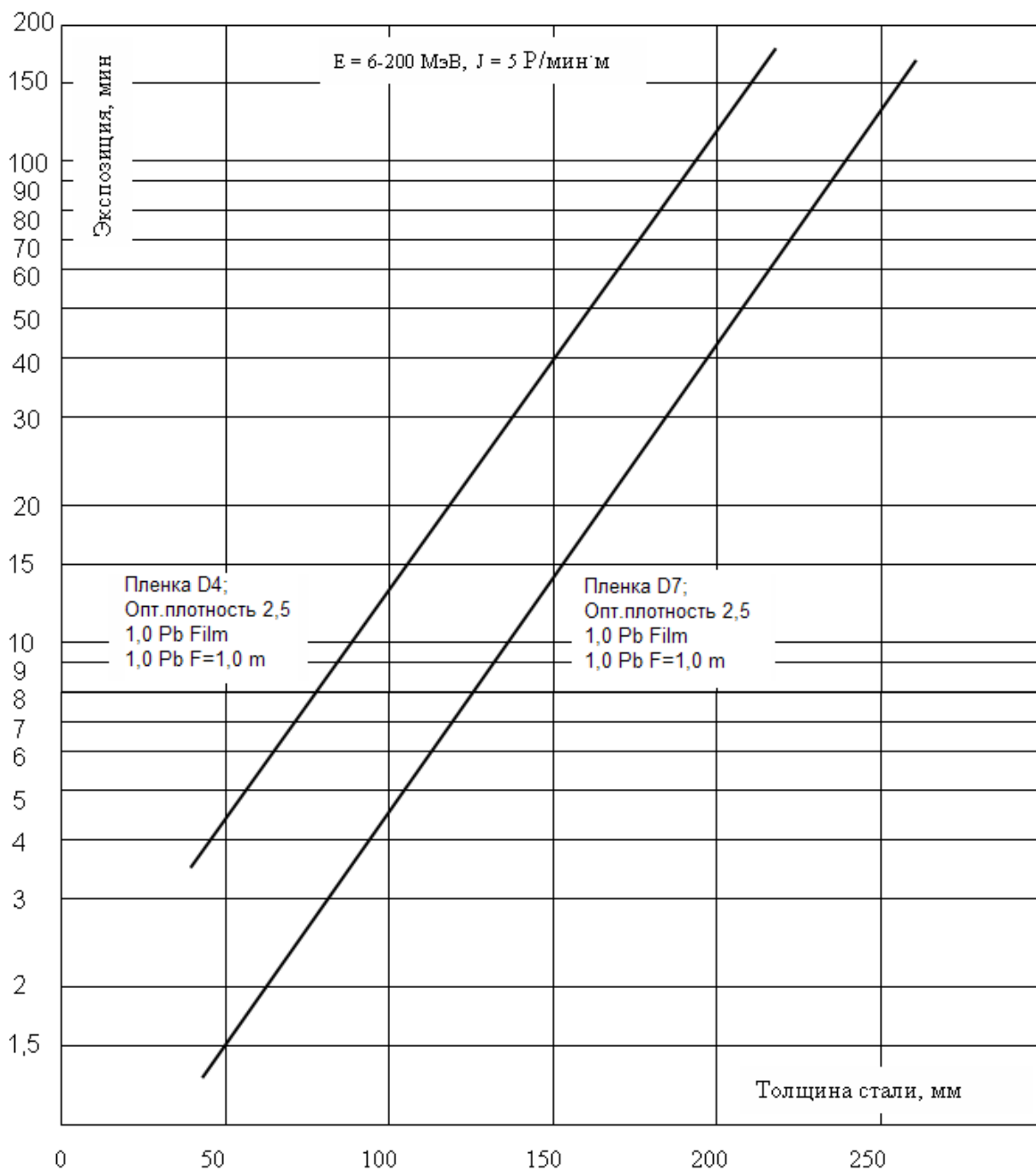


Рис. 2.2.8. График экспозиций для просвечивания стали

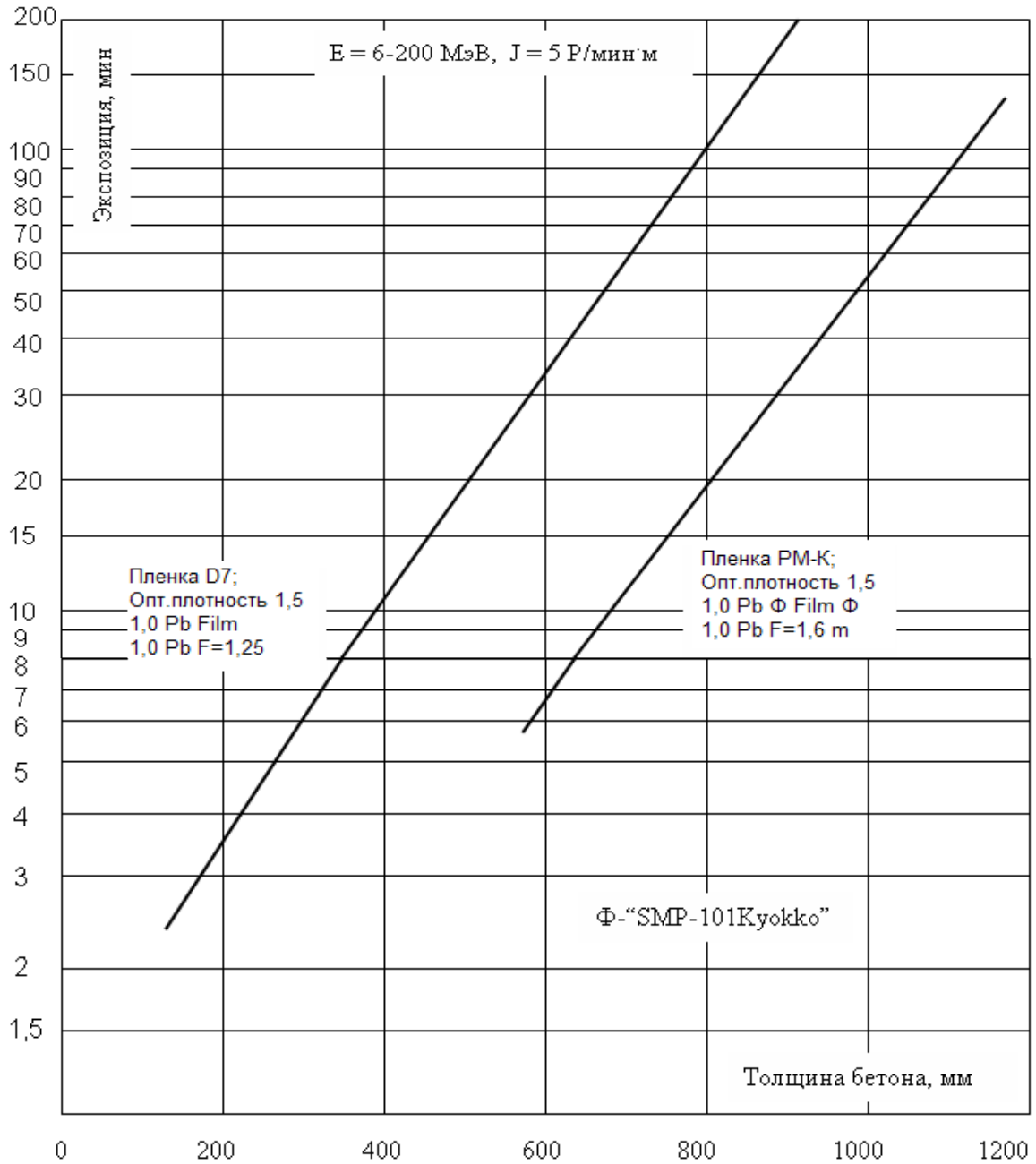


Рис. 2.2.9. График экспозиций для просвечивания бетона

При использовании встроенного дозиметра графики на рис. 2.2.8 и 2.2.9 пересчитываются в дозу. Например, при просвечивании стали толщиной 150 мм на пленку D7 с фокусным расстоянием 1 м требуется 15 мин, что при мощности дозы 5 Р/мин·м соответствует дозе 75 Р. Так как цена деления встроенного дозиметра составляет 0,1 Р, на нем необходимо установить 750 единиц.

10. При работе с выносным дозиметром необходимо знать дозу излучения на пленке для получения заданной плотности почернения. С высокой точностью в данных конкретных условиях требуемая доза может быть установлена на основании пробных снимков. Ориентировочно требуемые дозы можно установить по данным табл. 2.2.3 и 2.2.4.

Таблица 2.2.3

Требуемые дозы в зависимости от плотности почернения для пленки типа D7 «Agfa Gevaert»

Экспозиционная доза, Р	Оптическая плотность снимка, отн. единиц	Условия градуировки
1,4	1,5	Схема зарядки 0,5 мм Pb – передний экран, пленка, 1,0 мм Pb – задний экран. Образец плоский, стальной, толщиной 80 мм. Проявитель D19 «Kodak», фиксаж «Kodak Unifix»
2,25	2,0	
2,8	2,5	
3,5	3,0	

Таблица 2.2.4

Требуемые относительные дозы по сравнению с пленкой D7 при одинаковых условиях

Тип пленки	D4	MX5	AX	CX	PT-1	PT-4M
Относительное изменение дозы	2,65	2,8	1,25	0,57	0,53	1,6

11. Если требуется сделать несколько снимков в одинаковых условиях, рекомендуется на первом снимке устанавливать экспозицию с помощью выносного дозиметра. После окончания экспозиции следует записать, какое число набрал встроенный дозиметр. Далее можно задавать экспозицию встроенным дозиметром, устанавливая на нем это число.

12. При контроле толщины более 100 мм (по стали) и в случае, если вблизи с тыльной стороны кассеты имеются массивные отражатели (стена помещения, другое изделие и т. д.), на выносной блок дозиметра должен быть установлен защитный экран из свинца толщиной не менее 1,0 мм, поставляемый в комплекте бетатрона.

13. При больших экспозициях, после каждых 45 минут бетатрон необходимо отключать на 15 мин, оставив включенными вентиляторы охлаждения.

14. Детальная чувствительность радиографического метода, т. е. наименьший выявляемый дефект, должен иметь значение вдвое меньше,

чем наименьшие размеры объемных дефектов, допускаемых по действующей нормативно-технической документации на контролируемые изделия. Она определяется минимальным размером выявляемого дефекта и оценивается по изображению эталона на снимке.

Эталоны чувствительности следует устанавливать на контролируемом участке изделия со стороны, обращенной к источнику излучения. Проволочные эталоны следует устанавливать непосредственно, например, на шов с ориентацией проволок поперек шва. Канавочные эталоны следует устанавливать рядом со швом с ориентацией эталона вдоль шва. Пластинчатые эталоны следует устанавливать рядом со швом с ориентацией эталона вдоль шва или непосредственно на шов с ориентацией эталона поперек шва так, чтобы изображение маркировочных знаков эталона не накладывалось на изображение шва на снимке.

Список использованных источников

1. Воробьев В.А., Горбунов В.И., Покровский А.В. Бетатронная дефектоскопия. – Томск: Изд. ТПИ, 1971. – 156 с.
2. Чахлов В.Л., Волков В.Г., Звонцов А.А. и др. Исследование, разработка и производство малогабаритных бетатронов в Томском политехническом университете // Изв. вузов. Физика. – 2000. – № 4. – С. 134–135.
3. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. – М.: Атомиздат, 1984. – 510 с.
4. Воробьев А.А., Горбунов В.И., Воробьев В.А., Титов Г.В. Бетатронная дефектоскопия материалов и изделий. – М.: Госатомиздат, 1964. – 161 с.
5. Разработка и изготовление бетатрона для контроля сварных швов: отчет по хоздоговору 69/63 / Научно-исследовательский институт интроскопии; В.И. Горбунов. – Томск, 1965. – 84 с.
6. Разработка и создание передвижной дефектоскопической лаборатории комплексного контроля объектов нефтепроводов: отчет о НИР (промежут.) / Научно-исследовательский институт интроскопии; руководитель В.А. Бердоносков. – УДК 621.384.634.3; № 01860087820. – Томск, 1988. – 106 с.
7. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 350 с.
8. Ратнер А.В. Ускорители заряженных частиц. – М.: Наука, 1964. – 120 с.

2.3. Индукционный ускоритель бетатрон

2.3.1. Цель работы

Ознакомиться с устройством и работой ускорителя электронов – бетатрона.

2.3.2. Теоретические сведения

Бетатрон относится к классу циклических ускорителей, в которых электроны движутся в вакуумной ускорительной камере по траектории, приобретая необходимую энергию за счет ускоряющего вихревого электрического поля. Вихревое поле создается переменным или импульсным магнитным потоком, часть которого используется для управления движением электронов.

Бетатрон является источником электронного излучения и предназначен для контроля материалов и изделий, изучения радиационного воздействия на материалы и может быть использован в медицине и других отраслях народного хозяйства, где требуются пучки быстрых и высокоэнергетических электронов.

Создание ускоряющего электрического поля в бетатроне производится переменным магнитным потоком, величина которого со временем изменяется. Ускорение электрона начинается с момента, когда магнитное поле имеет малую величину, по мере увеличения магнитного поля энергия электрона будет возрастать. Накопление энергии электроном возможно при движении его по орбите постоянного радиуса. Для этого необходимо, чтобы скорость нарастания энергии электрона равнялась скорости нарастания магнитного поля в области движения электрона. Это условие выполняется, когда отношение магнитного потока, заключенного в круге орбиты, к площади этой орбиты численно равно удвоенной напряженности магнитного потока на орбите. В этом случае данная орбита называется равновесной. Магнитным полем ускорителя можно увеличивать энергию электрона и управлять траекторией его движения.

Электрон увеличивает свою энергию за счет прохождения большого числа оборотов. На протяжении пути электрон вследствие соударения с молекулами воздуха или по другим причинам может отклониться от равновесной орбиты и выйти в область, где магнитного поля нет. Поэтому для устойчивого движения необходимо оградить электрон от соударения с молекулами воздуха, т. е. проводить ускорение в вакууме и создать силы, автоматически возвращающие отклонившийся электрон на прежнюю орбиту. Для реализации этих требований ускорение проводится в специальной вакуумной камере, а магнитное поле в области орбиты делают убывающим с увеличением радиуса. При убывающем по радиусу магнитном поле появляются фокусирующие силы, которые заставляют отклонившийся электрон вернуться на равновесную орбиту.

Электроны – заряженные частицы, поэтому за счет электростатических сил они отталкиваются друг от друга. Следовательно, если в камеру бетатрона поместить не один, а два электрона, то в результате действия электростатических сил оба электрона отойдут от равновесной орбиты. При увеличении числа электронов этот эффект проявится сильнее. Электростатическое отталкивание электронов в бетатроне компенсируется фокусирующими силами магнитного поля. Для увеличения числа ускоряющихся электронов их необходимо вводить в камеру бетатрона при сравнительно высоком уровне магнитного поля, когда фокусирующие силы уже имеют значительную величину, а это предполагает, что для получения большого числа ускоряемых электронов они должны вводиться в камеру ускорителя при сравнительно высокой энергии.

Образование свободных электронов и сообщение им начальной энергии производится в электронной пушке – инжекторе. Если на электроды электронной пушки подавать постоянное напряжение, то вылетающие из нее электроны будут обладать одинаковой энергией. Так как управление движением электронов осуществляется переменным магнитным полем, то отношение между его величиной и энергией инжектируемых электронов, требуемое для ускорения электронов по орбите одного радиуса, будет выполняться только в течение очень малого отрезка времени, т. е. в период нарастания напряженности магнитного поля. Следовательно, на электроды пушки нужно подавать импульсное напряжение, причем момент его подачи должен быть согласован с величиной магнитного поля. Инжектор располагается вне равновесной орбиты, и электроны, вылетев, должны пройти некоторый путь по радиусу к равновесной орбите, который они проходят, колеблясь относительно равновесной орбиты. Поэтому камера ускорителя должна иметь определенную ширину, иначе электроны попадут на ее стенки.

Питание электромагнитов бетатронов

В индукционных ускорителях применяют три основных схемы питания обмоток электромагнита: схему с использованием переменного синусоидального тока промышленной или повышенной частоты, схему с дополнительным подмагничиванием постоянным током и схему импульсного питания.

При использовании каждой схемы должны быть обеспечены:

- расчетная мощность;
- компенсация реактивной мощности, потребителем которой является электромагнит бетатрона;
- заданная степень стабильности работы бетатрона.

Электромагнит бетатрона вследствие большого воздушного зазора между полюсами является потребителем значительной реактивной

мощности. Обмотки электромагнита включаются в резонансный контур вместе с батареей конденсаторов, благодаря чему источник питания компенсирует лишь потери энергии в контуре.

Увеличение частоты питания сопровождается ростом количества ускоренных электронов в единицу времени и повышением интенсивности излучения. Сокращение длительности излучения при повышенной частоте уменьшает общую длину пути электрона в камере и число столкновений с молекулами воздуха.

С другой стороны, с ростом частоты возрастают потери в железе и меди электромагнита и конденсаторах. Усложняется также синхронизация работы отдельных узлов и схем ускорителя.

При необходимости получения прерывистых пучков тормозного излучения применяют импульсное питание. В импульсном режиме снижаются потребляемая мощность и тепловые потери, что особенно важно для установок на большие энергии (от 50 МэВ и выше). Ввиду того, что потребляемая бетатроном мощность растет почти пропорционально кубической степени энергии, все индукционные ускорители на 100 МэВ и выше работают в импульсном режиме.

Величина энергии, запасенной в магнитном поле, определяется напряженностью магнитного поля и объемом воздушного зазора магнита. Эта энергия растет пропорционально степени 2,5 от конечной энергии ускоренных электронов. Используя дополнительное подмагничивание магнита постоянным током, можно уменьшить реактивную мощность конденсаторной батареи и снизить потребляемую мощность переменного тока, что, в свою очередь, уменьшает потери в стали. Таким образом, можно увеличить энергию электронов на 50 %.

Питание переменным синусоидальным током

Из-за значительной индуктивности обмотки электромагнита питание ее переменным током связано с низким значением $\cos\varphi$. Для повышения $\cos\varphi$ используется резонансная схема питания обмоток электромагнита. Эта схема включает намагничивающие обмотки, в цепь которых параллельно вводится конденсаторная батарея. Емкость конденсаторов подбирается так, чтобы собственная частота полученного колебательного контура равнялась частоте питающего тока. Емкость конденсаторной батареи равна:

$$C = \frac{I_0 \cdot 10^6}{\Omega U_0}, \quad (1)$$

где I_0 и U_0 – ток и напряжение на электромагните, $\Omega = 2\pi f$ – угловая частота.

При различных значениях U_3 находят оптимальные его значения. Для бетатронов с энергией от 2 до 10 МэВ наиболее приемлемым является напряжение от 0,5 до 1,5 кВ. Обычно выбирают большее напряжение, это позволяет уменьшить ток в намагничивающих обмотках и тем самым сократить тепловые потери в обмотках.

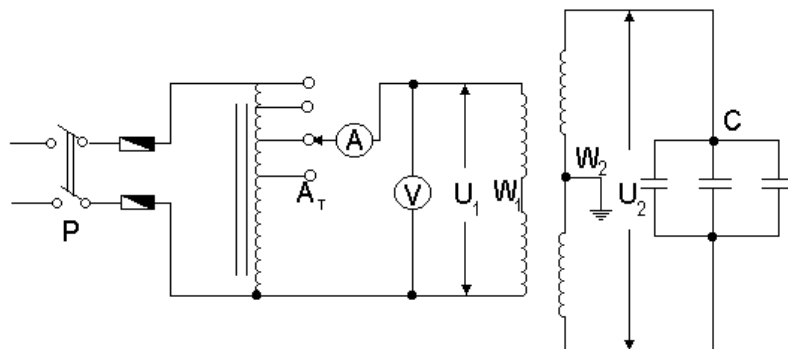


Рис. 2.3.1. Электрическая схема питания обмоток электромагнита от источника синусоидального тока промышленной частоты

От источника переменного тока с напряжением 380/220 В напряжение подается на автотрансформатор A_T , служащий для настройки контура в резонанс. Индикатором напряжения в первичном контуре является вольтметр V , а амперметр A служит показателем меры компенсации реактивной мощности электромагнита. Минимальному отклонению стрелки амперметра будет соответствовать максимальная компенсация реактивной мощности. Показания амперметра при полном резонансе определяются током, обусловленным мощностью потерь в железе и меди электромагнита, а также в конденсаторах компенсационной батареи. С помощью автотрансформатора регулируют энергию ускоренных электронов от максимального значения до возможного минимума – нескольких сот кэВ.

Суммарная мощность потерь для полной компенсации равна:

$$P_{\Sigma} = P_{жс} + P_m + P_k + P_{доб}, \quad (2)$$

где $P_{жс}$, P_m – мощность потерь в железе и меди электромагнита; P_k – мощность потерь в конденсаторах; $P_{доб}$ – потери в кабелях и проводах.

Потери в конденсаторах при $f = 50$ Гц составляют:

$$P_k = (0,003 \dots 0,005) P_p, \quad (3)$$

где $P_p = U_3 I_3$. Согласно этим формулам можно определить расчетную мощность автотрансформатора.

Питание индукционного ускорителя с использованием подмагничивания постоянным током

Более экономичной и совершенной работу ускорителя можно сделать, если изменить схему питания путем подмагничивания постоянным

током обмотки электромагнита. Такое усовершенствование создает в воздушном зазоре дополнительный постоянный магнитный поток. Наибольшая постоянная составляющая магнитного поля может составить по величине половину суммарного поля в магнитном зазоре.

При инжекции электронов на равновесной орбите должно существовать вихревое поле достаточно высокой напряженности. Исходя из этого, было найдено, что максимальное значение напряженности постоянного магнитного поля не должно превышать 98 % величины переменной составляющей. На рис. 2.3.2 пунктирной линией показана напряженность поля на орбите H_0 для бетатрона, работающего в обычном режиме, и сплошной линией – для того же бетатрона в случае, когда используется подмагничивание постоянным током. На левой вертикальной шкале даны значения H для центральной области и на равновесной орбите.

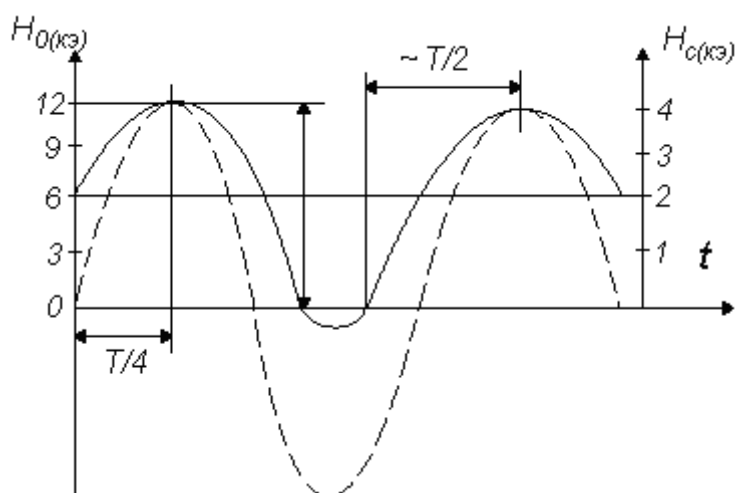


Рис. 2.3.2. Напряженность поля на орбите H_0 для бетатрона, работающего в обычном режиме и в случае, когда используется подмагничивание постоянным током

Благодаря тому, что пространственное распределение поля остается при подмагничивании таким же, как и без него, равновесная орбита остается на прежнем месте. Напряженность вихревого электрического поля на орбите понижается, так как уменьшилась скорость изменения магнитного потока. Одновременно увеличивается время ускорения. Следовательно, при подпитке обмоток электромагнита постоянным током уменьшается прирост энергии электронов за один оборот и увеличивается общее число оборотов. Общая энергия, приобретенная за цикл ускорения, при подмагничивании остается такой же, как и без него.

Уменьшение почти вдвое составляющей переменного магнитного потока при подмагничивании приводит к понижению потребляемой мощности переменного тока. Уменьшение амплитуды переменной со-

ставляющей сопровождается снижением потерь в железе. С другой стороны, появляются дополнительные потери в цепях постоянного тока, что приводит в общем случае к одинаковому значению потерь в меди как при подмагничивании, так и без него. Общие потери мощности в бетатроне с подмагничиванием значительно меньше, чем в обычном бетатроне.

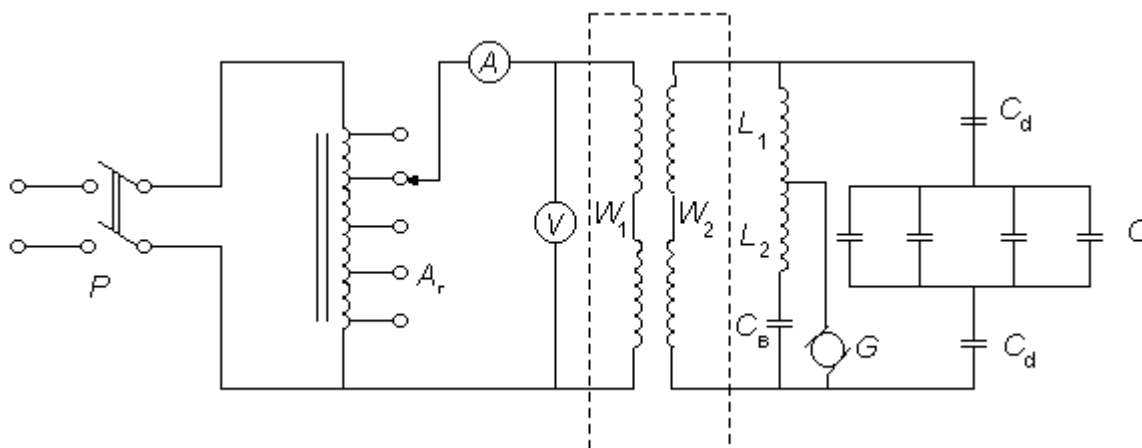


Рис. 2.3.3. Возможная схема смешанного питания

Необходимое дополнительное оборудование, связанное с подпиткой постоянным током, состоит из генератора постоянного тока G , реактора $(L_1 + L_2)$, блокировочного конденсатора C_b и конденсаторов C_d .

Параметры генератора G выбираются из заданных значений постоянной составляющей напряженности магнитного поля и числа витков намагничивающей обмотки. Наиболее громоздким и дорогостоящим элементом схемы является реактор $(L_1 + L_2)$. Реактор пропускает постоянную составляющую и ограничивает переменную составляющую тока в цепи. Чтобы нейтрализовать отстающий по фазе ток, возникающий в связи с наличием реактора, вводится конденсатор C_d . Для уменьшения величины переменного тока, протекающего через генератор постоянного тока, часть витков реактора соединяется параллельно с генератором. Кроме этих витков реактора, параллельно с источником постоянного тока включается также небольшой блокировочный генератор C_b , который позволяет скомпенсировать емкостной ток при помощи небольшой индуктивности части реактора.

Схема импульсного питания электромагнита бетатрона на МИБ-6Э

Формирователь импульсов тока в электромагните собран по традиционной схеме типа «конверт» (рис. 2.3.4), где формирование импульсов тока заключается в искусственном скачкообразном переводе тока из цепи тиристоров $T1, T2$ прямой ветви в цепь диодов $T3, T4$ обратной ветви

(напомним, что тиристор является по сути дела управляемым диодом). При этом происходит изменение знака напряжения на индуктивной нагрузке L (обмотке электромагнита, которая состоит из двух частей, намотанных на верхний и нижний полюса электромагнита бетатрона) и изменение тока в цепи конденсатора C , за счет чего конденсатор перезаряжается с той же полярностью, что и разрядился, т. е. происходит возврат энергии, накопленной в индуктивности L , в емкостной накопитель C .

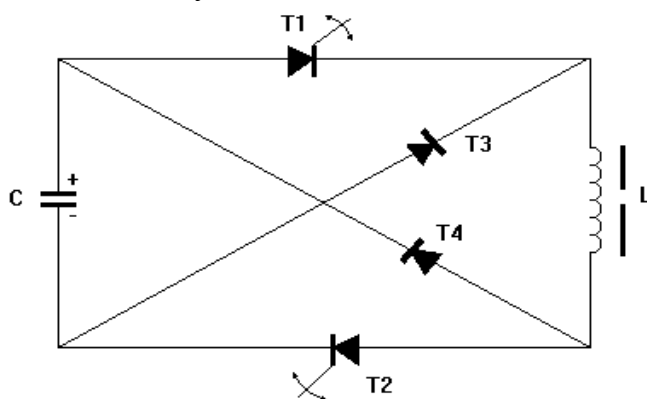


Рис. 2.3.4. Формирователь импульсов тока в электромагните

Характер изменения напряжения и тока в обмотке электромагнита, а также изменение напряжения на коммутирующем дросселе показаны на рис. 2.3.5. Форму импульса напряжения на обмотке электромагнита во время работы схемы можно наблюдать на экране осциллографа, если на его вход подать сигнал с витка, намотанного на стойку или полюс электромагнита (рис. 2.3.5, а). На рис. 2.3.5, б показана форма импульса напряжения на обмотке коммутирующего дросселя.

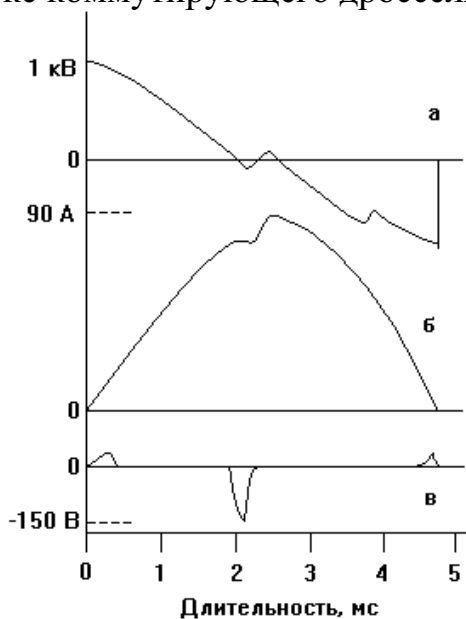


Рис. 5. Характер изменения напряжения и тока в обмотке электромагнита

Ток в электромагните L (величина тока находится в пределах 90...150 А) точно можно измерить, установив шунт в разрыв обмотки L . Форма импульса тока приведена на рис. 2.3.5, б. Применение шунта для измерения тока требует заземления одной из точек высоковольтной части схемы, что довольно небезопасно. Поэтому в данной работе для рассмотрения характера изменения тока в обмотке L используется трансформатор тока, принципиальная схема которого показана на рис. 2.3.6. Для подсоединения трансформатора тока используется виток со стойки или полюса электромагнита бетатрона.

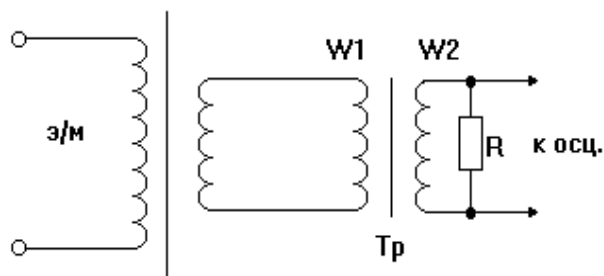


Рис. 2.3.6. Принципиальная схема трансформатора тока

Пульт управления

Работой бетатрона управляют с помощью пульта, который располагается в отдельной комнате. Пульт управления (рис. 2.3.7) предназначен для управления бетатроном и контроля его работы.

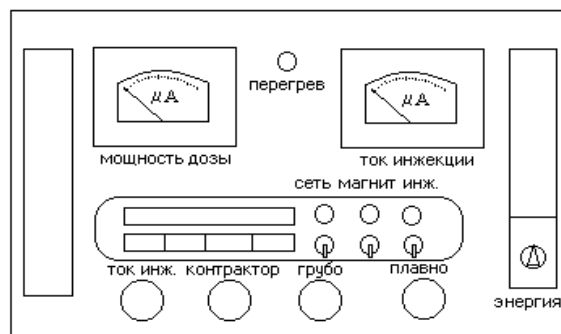


Рис. 2.3.7. Пульт управления

Пульт управления содержит следующие дирекциональные узлы:

- генератор импульсов запуска блока питания;
- схему стабилизации энергии;
- схемы задержки инъекции и вывода;
- формирователи импульсов запуска генераторов инъекции контракторов и вывода;
- измерители энергии и тока инъекции;
- блок питания.

На панели пульта управления расположены:

- переключатель уровня энергии, который позволяет дискретно менять энергию ускоренных электронов путем изменения амплитуды намагничивающего тока за счет изменения времени смещения t см;
- тумблеры включения напряжения сети, питания электромагнита и напряжения инжектора. Каждое включение сигнализируется цветовой сигнальной лампочкой;

На панели установлен также линейный газоразрядный индикатор уровня напряжения сети и кнопочный переключатель выбора используемого напряжения сети 110 В, 127 В, 220 В и 240 В;

- ручка плавного регулирования тока инъекции и микроамперметр для контроля энергии и тока инъекции;
- переменные резисторы для регулировки мощности дозы «грубо» и «точно»;
- переменный резистор для регулировки контрактора;
- справа на передней панели в нише, закрытой декоративной сеткой, установлен выходной разъем пульта, переменный резистор регулировки энергии;
- в центре между микроамперметрами установлена сигнальная лампочка «перегрев», сигнализирующая о срабатывании термореле, которое отключает питание электромагнита при его перегреве.

Ускорительная камера

Камера рентгеновская бетатронная КРБЗ-3 с выводом тормозного излучения содержит:

- 1, 2 – выводы анода;
- 3, 5 – выводы накала катода инжектора;
- 4 – вывод фокусирующего устройства;
- 6 – вывод слоя;
- 7 – электроды геттера.

Ток инъекции, мкА, не менее 0,48.

Ускорительная отпаянная стеклянная камера, которая помещается между полюсами электромагнита, имеет два патрубка и припаянный к ней электропровод. В одном патрубке установлен двухэлектродный инжектор электронов. Этим патрубком через маслонеполненный резиновый шланг камера соединяется с высоковольтным блоком, включающим высоковольтный импульсный и разделительный накальный трансформаторы, которые размещены в корпусе, залитом маслом. Высоковольтный блок снимается и устанавливается в электромагнит только вместе с камерой. Корпус анодной коробочки при работе бетатрона должен быть заземлен. В другом патрубке установлен геттер и вывод

проводящего покрытия камеры, который используется для нормального контроля камеры. С помощью геттера можно восстановить вакуум в камере, если он ухудшился.

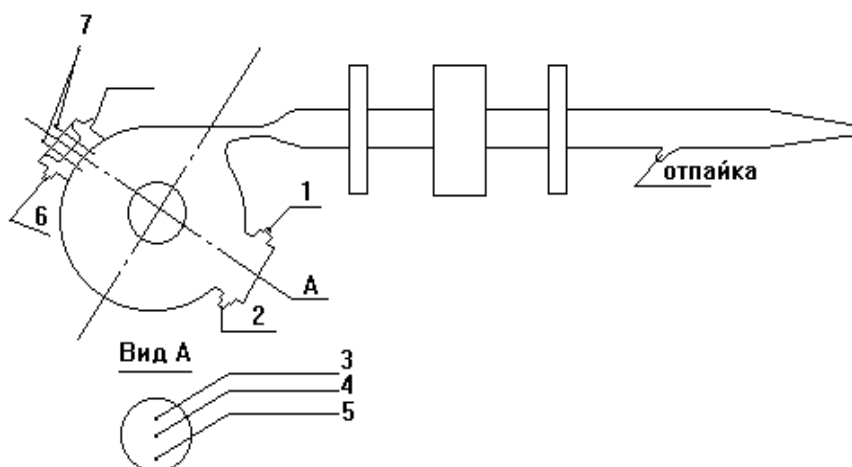


Рис. 2.3.8. Ускорительная камера

Камера выполнена совместно с электропроводом, выполняющем функцию формирования и вывода пучка в нужном направлении. Электропровод представляет собой стеклянный цилиндр с отпаянным наконечником. На внешней поверхности электропровода ближе к передней его части, которая стыкуется с камерой, закреплены 3 квадрупольные линзы. Размеры двух крайних линз вдоль поверхности электропровода в два раза меньше размера средней линзы в этом же направлении. Линзы состоят из полюсов магнитопровода и обмоток возбуждения. Обмотки возбуждения выполнены проводом ПЭЛ с диаметром 1,3 мм и соединены последовательно друг к другу в каждой линзе. Питание обмоток возбуждения линз осуществляется тремя стандартными блоками питания с напряжением 6,3 В и током 1,5...2 А. Средняя линза фокусирует пучок в плоскости равновесной орбиты, а две крайние – в вертикальной плоскости. Ускорительная трубка совместно с электропроводом выполнена таким образом, чтобы плоскость равновесной орбиты совпадала с серединой электропровода, а оптическая ось тракта формирования при своем продолжении в сторону ускорителя, проходя через нужную точку в окне магнитопровода, совпадала с касательной к радиусу окружности с радиусом $R = 110$ мм.

Вывод пучка

Существует несколько методов вывода электронного пучка из ускорительной камеры бетатрона. В данном бетатроне вывод пучка электронов осуществляется с помощью секториальной смещающей обмотки, которая располагается над и под ускорительной камерой (рис. 2.3.9).

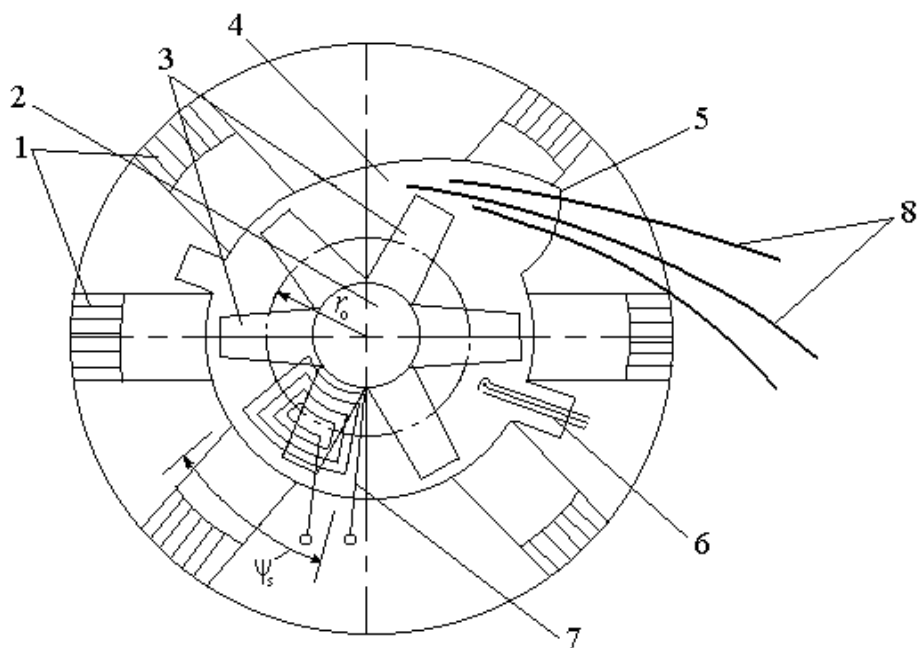


Рис. 2.3.9. Расположение секториальной смещающей обмотки

Витки обмотки вывода соединены последовательно и подключены к генератору импульсов тока вывода. В момент вывода электронного пучка по виткам обмотки пропускается импульс тока $T = 50$ мкс, амплитудой 150 А. В результате взаимодействия пучка с импульсным полем обмоток вывода, ослабляющим управляющее поле бетатрона, частицы совершают колебания и выходят из-под действия фокусирующих сил магнитного поля в краевое поле бетатрона и образуют выводимый пучок. Регулировка энергии электронов осуществляется изменением фазы задержки импульса тока в обмотках вывода.

2.3.3. Дозиметрический прибор

Дозиметром типа VA-J-18 измеряют мощность дозы выводимого потока электронов из электронопровода ускорительной камеры. В качестве детектора используется прутковая (наперстковая) камера. С помощью этой камеры дозиметром можно измерять мощность дозы от 30 мР/ч до 33300 Р/мин.

На рис. 10 представлена схема измерения мощности дозы с помощью дозиметра VA-J-18.

Возникающая в объеме камеры под действием излучения ионизация образует ток, который поступает на вход усилителя тока. Диапазон измерения тока – от $2,4 \cdot 10^{-12}$ А до $8 \cdot 10^{-9}$ А. В качестве усилителя тока используется усилитель с динамическим конденсатором. Такой усилитель обладает высокой чувствительностью, широким диапазоном измерения и малым дрейфом нулевого уровня.

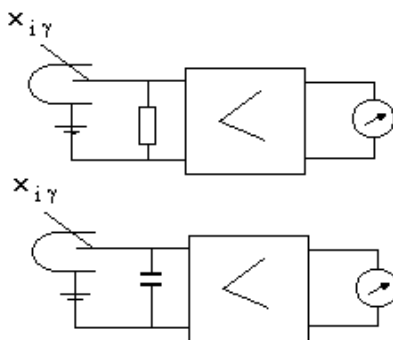


Рис. 2.3.10. Схема измерения мощности дозы с помощью дозиметра VA-J-18

Усиление производится путем модуляции входного сигнала от приводной системы преобразователя и подачи его на усилитель. При большой отрицательной обратной связи постоянного тока стабилизируется усиление. Частота вибрации виброконденсатора 480 Гц является оптимальной для усилителя переменного напряжения, применение которого позволяет избежать плавания нулевого уровня сигнала. Возникающее на измерительных сопротивлениях постоянное напряжение преобразуется виброконденсатором в пропорциональное переменное напряжение, которое усиливается в транзисторном малошумящем селективном усилителе, затем демодулируется в фазочувствительном выпрямителе и поступает на показывающий прибор.

К дозиметрическому прибору прилагается ионизационная камера, которая предназначена для измерения фазы и мощности дозы. Камера присоединяется к прибору кабелем.

Работа с прибором

Перед включением нажать кнопку «Ноль» выключателя «Коэффициент F2».

Нажать выключатель «Сеть». По истечении двух минут дозиметр готов к проведению измерения. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «Ноль» вход дозиметра замкнут накоротко, и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

Ионизационная камера закрепляется на штативе и фокусируется непосредственно на месте измерения.

Прутковая (наперстковая) камера является воздухоэквивалентной ионизационной камерой, предназначенной для измерения дозы и мощности дозы. Чувствительный ее объем равен 50 мм^3 . Материал электродов – воздухоэквивалентная смесь. Чувствительность при нормальных условиях – $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А} \cdot \text{мин} / \text{Р} \pm 3 \%$. Диапазон измерения мощности дозы 0–333, 1000, 3330, 10000, 33300 Р/мин. Конструктивно камера выполнена в виде прутка длиной 25 см, на который натянут пластмассовый шланг.

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облученной длины кабеля и может составлять при облученной длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем простого умножения трех коэффициентов и значения показывающей шкалы:

$$F_k \times F1 \times F2 \times F_{шк} = P \text{ [Р/мин]}.$$

F_k – коэффициент камеры, равный 3,33 для прутковой камеры.

$F1$ – переключатель 10.

$F2$ – кнопочный выключатель «Коэффициент F2» 8.

$F_{шк}$ – показания стрелочного прибора.

Для прутковой камеры предельное значение диапазона измерения 3000 Р/мин или 3000 Р.

2.3.4. Порядок работы

1. Включить шнур питания к сети 220 В, 50 Гц. По сигнальной лампочке блока питания убедиться, что сетевое питание имеется.

2. Убедитесь по газоразрядному индикатору пульта управления, что величина напряжения соответствует 220 В.

3. Включить тумблер «Сеть» пульта управления.

4. Через 3 мин включить тумблер «Магнит», при этом должен заработать силовой контур и электромагнит бетатрона.

5. Через 10 с включить тумблер «Инжекция» и установить по прибору (микроамперметру) ток инъекции с помощью ручки плавной настройки на пульте управления.

6. Установить переключателем «Энергия» нужное значение энергии в МэВ.

7. Добиться максимально возможного показания мощности дозы путем поочередной регулировки резисторов «Мощность дозы», «Грубо» и «Точно» и «Контрактор». При этом ток инъекции может иметь значение, отличающееся незначительно от указанного в формуляре камеры, так как в процессе эксплуатации он может изменяться по причине износа камеры.

8. Установить значение энергии, равное 1 МэВ, добиться максимального показания мощности дозы путем переключения тока на фокусирующих линзах 1, 2 и 3. Записать значения этих токов.

9. Повторить то же для энергий 2, 3, 4, 5 и 6 МэВ.

10. Построить зависимость $E = f(I_d)$.

11. Установить по осциллографу импульс смещения, равный энергии 1 МэВ. Добиться ручками «Мощность дозы», «Грубо» и «Точно» и «Контрактор», а также переключателями тока на фокусирующих линзах максимального отклонения стрелки показывающего прибора. Записать значение времени смещения по осциллографу и значение мощности дозы по стрелочному прибору дозиметра.

12. Повторить измерения для значений времени смещения, соответствующих энергиям 1, 2, 3, 4, 5, 6 МэВ.

13. Построить зависимость $t_{см} = f(P)$.

14. Сделать выводы по каждой зависимости.

2.4. Исследование поля излучения электронного пучка бетатрона при прохождении электронов через вещество

2.4.1. Цель работы

1. Изучить, как влияют различные материалы на пространственно-угловые характеристики излучения, изучить и провести демонстрацию программы «СПЕКТР», в которой представлено моделирование методом Монте-Карло электронного спектра заданной формы и пространственных распределений траекторий частиц, освоить методику измерения характеристик β -излучения бетатрона.

2. Изучить механизм взаимодействия электронов с веществом.

2.4.2. Задание

1. Изучить методы исследования поглощения и рассеяния электронного излучения в веществе.

2. Ознакомиться с программой « СПЕКТР»

3. Изучить устройство и правила работы с приборами:

- дозиметром VA-J-18
- ионизационной камерой плоскопараллельного типа
- шаровой и дозиметрической ионизационными камерами.

4. Получить кривые бокового распределения плотности пучка электронов бетатрона по измерению мощности дозы.

5. С помощью пакета программ «Спектр» промоделировать методом Монте-Карло пространственное распределение электронного излучения за поглотителями различного типа: алюминием, медью при параметрах, используемых в процессе измерения такой же характеристики (демонстрация.)

2.4.3. Теоретическая часть

Массовая тормозная способность при взаимодействии электронных пучков с веществом

При прохождении через вещество электроны теряют свою энергию вследствие электромагнитного взаимодействия с электронами и атомными ядрами поглотителя. Для электронов с относительно малой энергией потери обусловлены ионизацией и возбуждением электронов тормозящего вещества – ионизационными потерями. При энергии электрона, превышающей критическую, наиболее существенным является другой механизм взаимодействия – испускание электромагнитного тормозного излучения в электрических полях ядер тормозящего вещества – радиационные потери. Энергия электрона, при которой удельные радиационные потери становятся равными удельным ионизационным потерям, называется критической.

Полная массовая тормозная способность определяется формулой:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right) = \left(\frac{S}{\rho} \right) = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{ион}} + \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{рад}}. \quad (1)$$

Первый компонент содержит все энергетические потери при столкновениях, непосредственно приводящих к образованию вторичных электронов или к возбуждениям атомов. Вторым компонентом $\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{рад}}$ содержит все потери энергии первичного электрона, приводящие к образованию тормозного излучения.

Массовую тормозную способность, обусловленную столкновениями, можно вычислить по Бергеру и Зельтцеру [1]:

$$\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi r_e^2 \cdot m_e \cdot c^2 N_A Z}{\beta^2 M_A} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{\tau^2 (\tau + 2)}{2(I / m_e \cdot c^2)^2} \right] + F(\tau) - \delta \right\}, \quad (2)$$

где δ – поправка на эффект плотности [2]; $F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{[\frac{\tau^2}{8} - 2(\tau + 1) \ln 2]}{(\tau + 1)^2}$;

$m_e c^2$ – энергия покоя электрона; $\tau = E / m_e c^2$ – отношение кинетической энергии электронов E к энергии покоя; $\beta = v / c$; v – скорость электронов; c – скорость света в вакууме; N_A – постоянная Авогадро ($6,02252 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹); r_e – радиус электрона, равный $e^2 / (m_e c^2) \times (2,818 \cdot 10^{-15}$ м); M_A – молярная масса вещества A ; I – средняя энергия возбуждения, эВ; z – порядковый номер элемента в периодической системе.

Из формулы видно, что для определения массовой тормозной способности необходимо знать величину δ – поправку на эффект плотности и среднюю энергию возбуждения I . Эти величины указаны в табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1

Значения поправки на эффект плотности и средняя энергия возбуждения I

Наименование	Обозначение	Средняя энергия возбуждения I , эВ	Плотность ρ , г·см ⁻³
Водород	₁ H	19,2	$8,375 \cdot 10^{-5}$
Углерод	₆ C	78,0	2,265; 2,25; 1,7
Азот	₇ N	82,0	$1,165 \cdot 10^{-3}$
Кислород	₈ O	95,0	$1,332 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	₁₃ Al	166	2,7
Кремний	₁₄ Si	173	2,33
Железо	₂₈ Fe	286	7,87
Медь	₂₉ Cu	322	8,96
Свинец	₈₂ Pb	823	11,35

Среднюю потерю энергии электронов, обусловленную радиационными взаимодействиями, нельзя представить в простом общем виде, охватывающем все энергии и материалы. Поэтому для сравнения дано общее выражение для массовой радиационной тормозной способности только для высоких энергий (полная экранировка: $\tau \gg 1 / \alpha Z^{1/3}$):

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{рад}} = \frac{4r_e^2 \alpha}{\beta^2} \cdot N_A \frac{Z(Z+1)}{M_A} (\tau+1) m_e c^2 \ln(183Z^{-1/3} + 1/18), \quad (3)$$

где α – постоянная тонкой структуры ($\alpha \sim 1 / 137$).

Очевидно, что массовая радиационная способность возрастает почти линейно с кинетической энергией в диапазоне энергий «единицы МэВ», в то время как массовая тормозная способность, обусловленная столкновениями, имеет в этой области слабую логарифмическую энергетическую зависимость.

Пробег при непрерывном замедлении

Среднюю длину пути электрона с начальной энергией E_0 можно определить интегрированием величины, обратной полной тормозной способности:

$$r_0 = \int_0^{E_0} \left(\frac{S(E)}{\rho}\right)_{\text{общ}}^{-1} dE. \quad (4)$$

Это выражение основано на приближении непрерывного замедления и определяет длину пути, который электрон прошел бы в процессе замедления в неограниченной однородной среде при условии, что скорость потери энергии вдоль всего трека всегда равна средней скорости потери энергии.

В действительности потери энергии непостоянны, то есть флуктуируют, чем обычно пренебрегают. Кроме того, пробег является длиной пути, а не глубиной проникновения в данном направлении. Когда известен средний пробег, можно определить практический пробег с помощью масштабного соотношения. Средняя длина пробега является практическим параметром для масштабных кривых глубинной дозы.

Массовая рассеивающая способность

Массовую рассеивающую способность T / ρ можно определить по аналогии с массовой тормозной способностью (см. уравнение 1) как величину, выражающую увеличение среднего квадрата угла рассеяния $d\bar{\theta}^2$, приходящееся на массовую толщину ρdl , измеряемую в единицах массы, соответствующей единичному поперечному сечению

$$\frac{T}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{\theta}^2}{dl}. \quad (5)$$

Такая запись указывает на то, что рассеивающая способность подобна тормозной способности.

В настоящее время для расчета массовой рассеивающей способности используют выражение, где учитывается зависимость от атомного номера z , отношение кинетической энергии электрона τ к его собственной энергии, связанной с массой покоя, то есть содержит более тонкую оценку эффектов экранирования [3]:

$$\frac{T}{\rho} = \pi \left(\frac{2r_e Z}{(\tau+1)\beta^2} \right)^2 \frac{N_A}{M_A} \times \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{\theta_m}{\theta_\mu} \right)^2 \right] - 1 + \left[1 + \left(\frac{\theta_m}{\theta_\mu} \right)^2 \right]^{-1} \right\}. \quad (6)$$

В этом выражении θ_m – граничный угол, связанный с конечным размером ядер. Он определяется отношением приведенной длины волны де Бройля к радиусу ядра:

$$\theta_m = \frac{2A^{-1/3}}{\alpha\beta(\tau+1)}. \quad (7)$$

Вклад от рассеяния электрон-электрон, которое определяется поперечным сечением Мёллера, не входит в уравнение (6), поскольку это связано со значительными энергетическими потерями. Его можно приближенно учесть, заменяя z^2 на $z(z+1)$ в уравнении (6).

В табл. 2.4.2 дана массовая рассеивающая способность некоторых элементов.

Таблица 2.4.2

Массовая рассеивающая способность T / ρ , рад² · см² · г⁻¹

E, МэВ	Показатель степени	Элемент										Показ. степ.
		¹ H	⁶ C	⁷ N	Воз-дух	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁸ Fe	²⁹ Cu	⁸² Pb	
0,2	+1	1,12	2,92	3,36	3,51	3,8	5,68	6,28	1,02	1,11	2,41	+2
0,4	0	3,74	9,88	1,14	1,19	1,29	1,93	2,14	3,51	3,8	8,41	+1
0,6		2,01	5,35	6,17	6,45	6,98	1,05	1,16	1,92	2,08	4,63	
0,8		1,3	3,47	4,01	4,19	4,54	6,85	7,58	1,25	1,36	3,04	
1,0	-1	9,25	2,48	2,87	3,0	3,25	4,91	5,43	8,99	9,74	2,19	
2,0		3,15	8,57	9,90	1,04	1,12	1,70	1,89	3,14	3,40	7,74	0
3,0		1,64	4,48	5,18	5,42	5,87	8,92	9,90	1,65	1,79	4,09	
4,0		1,02	2,79	3,22	3,37	3,66	5,57	6,18	1,03	1,12	2,57	
5,0	-2	6,96	1,92	2,22	2,32	2,52	3,83	4,25	7,11	7,73	1,78	
6,0		5,08	1,40	1,62	1,7	1,84	2,81	3,12	5,22	5,67	1,31	
8,0		3,08	8,53	9,87	1,03	1,12	1,71	1,90	3,18	3,46	8,00	-1
10,0		2,07	5,76	6,66	6,98	7,57	1,16	1,28	2,15	2,34	5,42	

Приближенную сумму массовой рассеивающей способности для электронов с энергией E можно получить, пользуясь следующей формулой:

$$\frac{T}{\rho} \approx \left(\frac{E_S}{E} \right)^2 / \beta^4 X_0, \quad (8)$$

где E_S – имеет постоянное значение 21,2 МэВ, а значения X_0 в различных материалах приведены в табл. 3 и вычислены с заменой z^2 на $z(z + 1)$, использованной в выражении для рассеивающей способности.

Таблица 2.4.3

Массовая радиационная тормозная способность $(S / \rho)_\gamma$, МэВ · см² · г⁻¹ и радиационная длина X_0 , г · см⁻²

E, МэВ	Показатель степени	Элемент										Показ. степ.
		¹ H	⁶ C	⁷ N	Воз-дух	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁸ Fe	²⁹ Cu	⁸² Pb	
0,2	-3	1,511	3,896	4,55	4,789	5,215	8,344	9,349	1,796	1,926	5,555	-2
0,4		2,232	5,173	6,009	6,311	6,856	1,082	1,209	2,209	2,45	7,34	
0,6		3,096	6,759	7,827	8,21	8,904	1,390	1,551	2,791	3,087	9,132	
0,8		4,076	8,559	9,889	1,036	1,122	1,739	1,938	3,448	3,803	1,098	-1
1,0		5,152	1,053	1,214	1,271	1,376	2,119	2,36	1,548	1,710	1,290	

E, МэВ	Показатель степени	Элемент										Показ. степ.
2,0	-2	1,162	2,213	2,54	2,656	2,869	4,350	4,833	8,315	9,103	2,319	
3,0		1,931	3,561	4,078	4,26	4,598	6,924	7,682	1,306	1,425	2,427	
4,0		2,782	5,026	5,747	5,999	6,471	9,702	1,076	1,814	1,976	4,582	
5,0		3,693	6,576	7,512	7,838	8,449	1,263	1,399	2,346	2,552	5,772	
6,0		4,651	8,193	9,352	9,754	1,051	1,567	1,735	2,896	3,146	6,991	
8,0		6,675	1,158	1,320	1,376	1,482	2,200	2,435	4,036	4,378	9,495	
10,0		8,809	1,513	1,723		1,932	2,858	3,161	5,216	5,650	1,206	0
X ₀	+1	6,305	4,27	3,799	3,661	3,424	2,401	2,182	1,384	1,296	6,369	+1

Угловое распределение электронов

Распределение по направлениям электронов, прошедших через рассеивающую фольгу некоторой толщины, зависит от случайных событий при рассеянии на ядрах и, в меньшей степени, на электронах вещества. Эти случайные события не только определяют угловое распределение электронов в данном месте, но и влияют на пространственное распределение плотности потока электронов. Угловое распределение электронов важно для дозиметрии, так как оно влияет, например, на форму распределения поглощенной дозы в среде, на поправку к показаниям дозиметра при известном угловом распределении чувствительности.

Для большинства практических приложений в радиационной дозиметрии достаточно пользоваться теорией, не учитывающей редкие случаи однократного рассеяния на большие углы, и поэтому приводящей к чисто гауссовым угловым распределениям многократно рассеянных электронов. В таких случаях для описания углового распределения достаточно пользоваться представлением о рассеивающей способности (см. уравнение 5).

Аналитическое выражение для углового распределения первичных электронов, прошедших данное расстояние в плоскопараллельных слоях с постоянной или переменной массовой рассеивающей способностью, имеет вид:

$$\Phi_{\theta}(z) = \Phi(0) \frac{\exp[-\theta^2 / \bar{\theta}^2(z)]}{\pi \bar{A}^2(z)}. \quad (9)$$

Средний квадрат угла разброса на глубине z определяется выражением:

$$\bar{\theta}^2(z) = \bar{\theta}_i^2 + \int_0^z T(u) du, \quad (10)$$

где $\bar{\theta}_i^2$ – начальный средний квадрат угла разброса пучка, падающего на плоскость перпендикулярно при $z = u = 0$; T – линейная рассеиваю-

щая способность (см. рис. 2.4.1). Интегрирование выражения (9) по всем направлениям дает:

$$\int_0^{\infty} \Phi_{\theta}(z) 2\pi\theta d\theta \equiv \Phi(0). \quad (11)$$

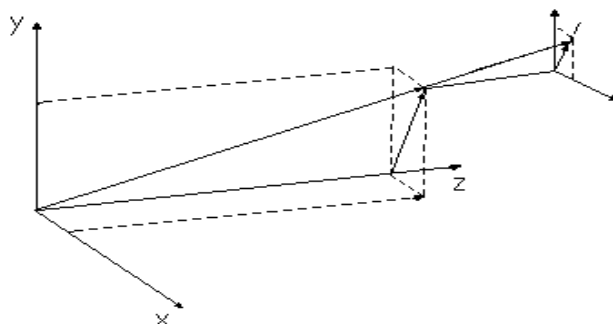


Рис. 2.4.1. Средний квадрат угла разброса по глубине

С учетом предположений о цилиндрической симметрии и о малых углах проекция функции распределения на плоскость x, z принимает вид:

$$\Phi_{\theta_x} = \Phi(0) \frac{\exp\left[-\frac{\theta_x^2}{\bar{\theta}^2(z)}\right]}{\left[\pi\bar{\theta}^2(z)\right]^{1/2}}. \quad (12)$$

Эта проекция распределения нормирована так, что:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\theta_x}(z) d\theta_x \equiv \Phi(0). \quad (13)$$

Полные (непроектированные) функции распределения можно получить как произведение распределений, проектированных на направлениях x и y (уравнение 12), потому что в предположении о малых углах $\theta^2 = \theta_x^2 + \theta_y^2$.

Ослабление β -излучения, определение практического пробега электронов и их максимальной энергии.

Ослабление β -излучения при прохождении через вещество обусловливается всеми рассмотренными выше механизмами взаимодействия. Для β -излучения, как и для других заряженных частиц, характерно, что оно нацело поглощается слоем вещества некоторой толщины. При этом число электронов, прошедших через слой вещества заданной толщины, является постоянно уменьшающейся функцией толщины. В общем случае прохождение первичных электронов как функция глубины точно описывается выражением вида

$$\varepsilon_T(Z) = \exp\left[-a\left(\frac{Z}{R_{ex}}\right)^b\right], \quad (14)$$

где b – безразмерная постоянная, которая является мерой наклона кривой прохождения электронов; $a = (1 - 1 / b)^{1-b}$ и учитывает условие, при котором точка пересечения с осью абсцисс касательной к кривой прохождения электронов в ее точке перегиба совпадает с R_{ex} .

Для многих практических задач экстраполированный пробег R_{ex} можно приближенно заменить практическим пробегом на кривых зависимости глубины поглощенной дозы. Практический пробег определяется точкой, в которой касательная к кривой зависимости поглощенной дозы от глубины, построенная в точке ее наиболее крутого спада (в точке перегиба), находящейся на почти прямолинейном ниспадающем участке, пересекает экстраполированную кривую фона тормозного излучения.

Определение практического пробега, т. е. толщины, при которой отсчеты, обусловленные β -электронами, перестают влиять на полное число отсчетов, связано с известными трудностями. Во-первых, обеспечение статистической точности в определении интенсивности β -излучения вблизи фона требует значительного времени. Во-вторых, экстраполяция кривой поглощения к уровню фона затруднена отсутствием прямолинейного участка кривой вблизи фона. Для уточнения величины практического пробега экстраполяцию кривой поглощения к уровню фона следует производить в полулогарифмическом масштабе, пользуясь тем, что ход кривой поглощения β -излучения в веществе близок к экспоненциальной зависимости.

Детальное изучение энергетического спектра β -излучения производят спектрометрическими методами, требующими сложной аппаратуры и источников большой активности. В тех случаях, когда требуется определить максимальную энергию β -спектра с погрешностью, не превышающей 5 %, можно использовать метод поглощения. Для этого измеряют и строят кривую поглощения β -излучения в веществе, то есть, пользуясь набором тонких фольг, снимают зависимость интенсивности электронов, прошедших через набор фольг, олицетворяющих толщину поглотителя. Пользуясь кривой поглощения, определяют максимальную энергию электронов простейшим способом нахождения практического пробега β -электронов. Затем для определения верхней границы β -спектра пользуются графиком зависимости пробега электронов от их максимальной энергии, полученной с помощью магнитного β -спектрометра.

Моделирование методом Монте-Карло электронного спектра заданной формы и пространственных распределений поля излучения за поглотителем

Описание методики моделирования.

Прохождение элементарных частиц (электроны, фотоны, протоны и т. д.) через вещество является случайным процессом. Каждый элемент траектории частицы – длина пробега между столкновениями с атомами вещества, угол рассеяния после столкновения, энергия рассеяния – являются случайными. Они определяются вероятностными законами взаимодействия, зависящими от типа частиц, их энергии и от характеристик вещества, где двигаются частицы. Эти законы известны, они получены решением соответствующих уравнений в квантовой механике.

Зная вероятностные законы взаимодействия частиц с атомами вещества, мы можем, используя соответствующие алгоритмы, моделировать каждый элемент траектории частицы в веществе: случайный пробег между столкновениями, тип взаимодействия (рассеяние, поглощение), направления движения и энергии первичной и вторичных частиц после взаимодействия, которые также являются случайными. Последовательно моделируя эти элементы траектории, можно построить всю траекторию частицы в веществе, которая будет аналогом реальной траектории.

Совокупность таких траекторий, полученных в процессе моделирования, можно использовать для приближенного вычисления (оценки) необходимых характеристик поля излучения: энергетических, угловых и пространственных распределений частиц, распределения поглощенной энергии и т. д. Такой метод решения задачи называют методом статистического моделирования или методом Монте-Карло.

Для решения поставленной задачи была разработана специальная программа, которая на основе метода Монте-Карло рассчитывает энергетические, угловые и пространственные характеристики электронов и фотонов, прошедших через некоторый поглотитель. Моделирование траекторий частиц в ней проводится для следующей геометрии поглотителя, которая соответствует реальной геометрии:

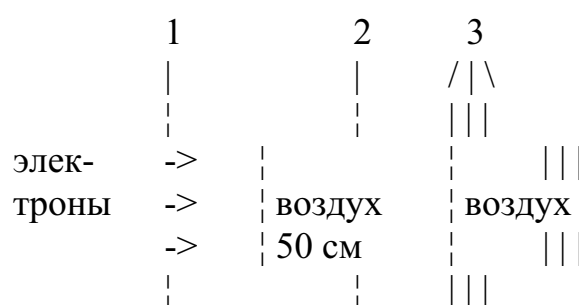


Рис. 2.4.2. Геометрия моделирования траекторий частиц:

- 1 – стеклянная стенка ускорительной камеры (1 мм);
- 2 – мишень-рассеиватель (Al, толщина меняется);
- 3 – плоскости, на которых вычисляются спектры

Источник электронов имеет дискретный спектр с некоторым набором энергий электронов (импульсов) и произвольным числом электронов в каждом импульсе. Такой источник экспериментально можно реализовать в электронном ускорителе бетатроне.

Методом Монте-Карло рассчитывается весь процесс получения требуемого спектра электронов. Задается набор энергий электронов и их число для каждой энергии и моделируется перенос излучения через стенку ускорительной камеры, воздушное пространство до Al мишени, саму мишень, и последующий слой воздуха. Электроны за мишенью сортируются по энергии. Один цикл расчета заканчивается, когда испущены все первичные электроны с заданными энергиями.

Обработка спектров электронов за мишенью происходит после моделирования некоторого (любого) числа циклов. Для этого необходимо нажать «Esc». При этом рассчитанные спектры электронов выводятся в виде графиков на экран дисплея и сравниваются с заданной формой энергетического распределения электронов. Одновременно рассчитываются 5 спектров для пяти расстояний от алюминиевой мишени.

ВНИМАНИЕ! Рисунок с экрана дисплея может быть сохранен в файл, его формат *.bmp.

Данный программный пакет, реализующий все этапы реального эксперимента, по существу является численным экспериментом на ЭВМ.

Описание пакета программ «Спектр»

Программа «СПЕКТР» представлена в виде программного пакета SPECTRUM, который написан на языке ФОРТРАН-77 под транслятор FORTRAN PowerStation фирмы Microsoft. Поэтому результирующий код является 32-разрядным, работает в защищенном режиме процессоров 386 и выше фирмы Intel (и совместимых с ней) и может использовать всю память (нижнюю и расширенную). В состав пакета входят следующие файлы:

- 32spectr.exe – программа;
- const1sp.fce – файл констант, необходимых для моделирования траекторий электронов и фотонов в поглотителе;
- dat029.hlp – пример файла входных данных;
- dosxmsf.exe – файл фирмы Microsoft, позволяющий загружать программу в расширенную память;
- modern.fon – файл шрифтов;
- spectrum.doc – настоящая инструкция.

Запуск программы:

32spktr.exe aaa bbb,

где aaa – произвольное имя файла входных данных (например, dat029.hlp), bbb – произвольное имя файла, куда после окончания счета помещаются результаты, если эти результаты не нужны, то bbb = nul.

Описание входных данных из файла dat029.hlp:

.13,100* - z(см) (AL, воздух) – толщина AL мишени и слоя воздуха за ней в см,

40. * - R(см) – радиус всего поглотителя в см,

51.,60.,... * zRD(см) (+50,1см) – границы слоев, где вычисляются спектры (перед алюминиевой мишенью толщина поглотителя = .1 см стекла ускорительной камеры + 50 см воздуха),

16 * NFE – число интервалов в рассчитываемом спектре (спектр выводится в виде гистограммы),

0.,...3.5* значения энергетических границ спектра в МэВ (ОБЯЗАТЕЛЬНО! $E_{\min} = 0$, $E_{\max} = 3.5$),

500 * NTR – число историй, для которых на экран выводятся траектории частиц (электроны – голубые, фотоны – красные, позитроны – зеленые), если NTR = 0, то траектории частиц не строятся,

13,7,10,7 * NCFIG – цвета веществ на экране: стекло камеры – зеленое(10), воздух – серый(7), AL – фиолетовый (13), цвета веществ можно менять, диапазон номеров 1–15,

1. * RIS – радиус первичного пучка (см),

1. * ALL – угол раствора конуса первичного пучка (град),

11 * NEIMP – число энергий первичного электронного спектра,

1.4,1.5... * значения этих энергий,

150,120,... * число электронов, испущенных с соответствующей энергией.

Входные данные, которые можно изменить, чтобы получить необходимую форму спектра:

- 1) толщина алюминиевой мишени;
- 2) толщина слоя воздуха за мишенью;
- 3) положение границ, где вычисляются спектры;
- 4) энергии начального спектра;
- 5) число импульсов для каждой энергии;
- 6) радиус R всего поглотителя;
- 7) угол раствора конуса первичного пучка.

ВНИМАНИЕ! Траектории электронов строятся до энергии 0,1 МэВ, а максимальная энергия первичного электрона не может превышать 10 МэВ.

При работе программы на экран выводится следующая информация:
 $N_{\max} = 500000$ – Мах число историй;
 N_{ist} – номер истории, которая считается;
 $T = ?$ – время счета;
 $NIP_{\max} = ?$ – число всех электронов в импульсе (для всех энергий);
 $NC = ?$ – число рассчитанных импульсов.

Описание установки и методика эксперимента

Измерение поглощения электронного излучения

Для измерения поглощения электронного излучения в материалах производят юстировку ионизационной камеры наперсткового типа по оси симметрии пучка излучения. На рис. 2.4.3 показана схема установки.

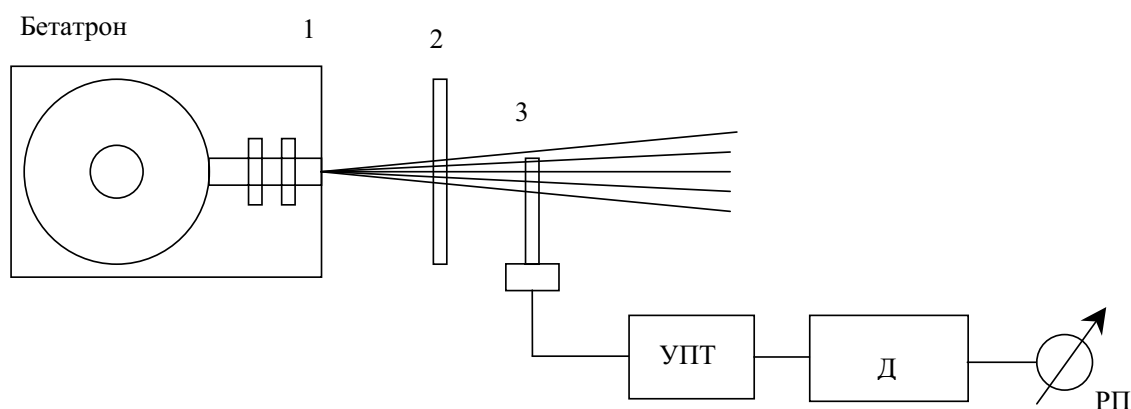


Рис. 2.4.3. Схема экспериментальной установки:

*1 – источник β -излучения – бетатрон МИБ-6Э;
 2 – образец заданной толщины; 3 – прутковая ионизационная камера (детектор); УПТ – усилитель постоянного тока; Д – дозиметр;
 РП – регистрирующий прибор*

Снятие кривой поглощения производят путем измерения мощности дозы прошедшего через образец ослабленного излучения в центре пучка при различной толщине образца одного и того же материала. Толщину наращивают до полного поглощения электронов в веществе образца. Нарращивание толщины осуществляют при выключенном излучении бетатрона.

Измерение пространственного распределения электронов в среде

Пространственное распределение электронов в среде сильно зависит от рассеивающих способностей материалов, находящихся на пути пучка. Измерение распределения производят на установке, схема которой представлена на рис. 2.4.4.

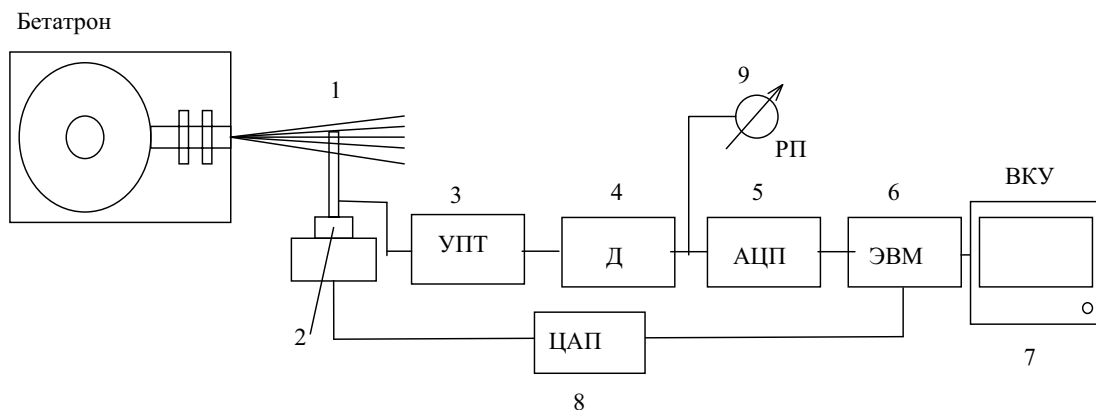


Рис. 2.4.4. Схема установки: 1 – ионизационная камера; 2 – платформа для задания возвратно-поступательного движения камеры; 3 – усилитель постоянного тока; 4 – дозиметр; 5 – АЦП; 6 – ЭВМ; 7 – видеоконтрольное устройство; 8 – ЦАП; 9 – регистрирующий прибор дозиметра

На данной установке эксперимент проводят с применением ослабляющих излучение материалов. В качестве среды используется воздух и другие материалы. Измерение мощности дозы производят с помощью ионизационной камеры 1, которая установлена на платформе 2 и может двигаться в направлении, перпендикулярном направлению пучка электронов.

Камера 1 фиксирует поток электронов в малом телесном угле и позволяет измерить плотность распределения электронов в различных точках пучка в поперечном его сечении. Сигнал с ионизационной камеры оцифровывается с помощью АЦП и поступает в память ЭВМ 6. Кривая распределения плотности потока электронов отображается на ВКУ 7. Регистрирующий прибор РП 9 служит для настройки и контроля процесса измерения.

Работа с дозиметром

Перед включением нажать кнопку «Ноль» выключателя «Коэффициент F2».

Нажать выключатель «Сеть». По истечении двух минут дозиметр готов к проведению измерений. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «Ноль» вход дозиметра замкнут накоротко, и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

Ионизационная камера закрепляется на штативе и фокусируется непосредственно на месте измерения.

Шаровая и дозиметрическая камера являются воздухоэквивалентными ионизационными камерами, предназначенными для измерения дозы и мощности дозы. Чувствительный объем камер равен 1500 мм^3 и 1500 см^3 соответственно. Материал электродов – воздухоэквивалентная смесь. Чув-

ствительность при нормальных условиях – $8 \cdot 10^{-12}$ А·мин/Р \pm 3 %. Диапазон измерения мощности дозы 0–3, 10, 30, 100, 300 Р/мин. Конструктивно камера выполнена в виде прутка длиной 25 см, на который натянут пластмассовый шланг.

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облученной длины кабеля и может составлять при облученной длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем определения номинальной величины шкалы:

$$F_k \times F1 \times F2 = P \text{ [Р/мин]}.$$

где: F_k – коэффициент камеры, равный 3,33 для прутковой (наперстковой) камеры; $F1$ – переключатель «коэффициент $F1$ »; $F2$ – кнопочный выключатель «коэффициент $F2$ »; а затем снимают показания стрелочного прибора VA-J-18 по этой шкале.

2.4.4. Порядок выполнения работы

1. Провести демонстрацию программы «Спектр», предлагаемой для работы, моделирующей методом Монте-Карло прохождение элементарных частиц через вещество.

2. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию ускорения электронов.

3. Установить ионизационную камеру в центр предполагаемого пучка излучения по схеме рис. 2.4.2.

4. Включить необходимую аппаратуру для прогрева.

5. Установить перед выходным окном электропровода фильтр из меди минимальной толщины 0,09 мм.

6. Включить поочередно питание электромагнита и «Ток инъекции».

7. Снять значение мощности дозы по шкале дозиметра VA-J-18.

8. Выключить ток инъекции и питание электромагнита.

9. Повторить пп. 5–8, каждый раз наращивая толщину фильтра из меди соответственно до 0,18; 0,74; 1,92 и 3 мм.

10. Повторить пп. 5–8 с фильтром из алюминия толщиной – 0,04; 0,2; 0,96; 2,98; 5 и 8 мм.

11. Повторить пп. 5–8 с фильтром из алюминия толщиной – 10 мм; измерить шум в течение 1 мин.

12. Подготовить аппаратуру для измерения пространственного распределения электронов в среде согласно схеме, представленной на рис. 3.

13. Установить фильтр из меди заданной толщины.

14. Измерить расстояние между фильтром и центром ионизационной камеры.
15. Установить камеру с помощью платформы за пределы предполагаемого пучка электронов.
16. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию ускорения электронов.
17. Включить питание электромагнита.
18. Включить тумблер «Ток инъекции».
19. Настроить стабильную работу бетатрона.
20. Включить движение платформы с ионизационной камерой.
21. С помощью программы записать показания ионизационной камеры в память ЭВМ.
22. Выключить «Ток инъекции» и питание электромагнита.
23. Сменить фильтр из меди на фильтр из алюминия той же толщины.
24. Повторить пп. 15–22.

2.4.5. Обработка экспериментальных данных

1. Полученные результаты измерений ослабления β -излучения при прохождении через вещество заданной толщины включить в программу «Grapher» и распечатать.
2. Воспроизвести на экране и затем распечатать аппроксимирующую зависимость в полулогарифмическом масштабе поглощения электронов в каждом из заданных материалов и шумовой фон тормозного излучения.
3. Определить практический пробег электронов, экстраполируя наклон кривой прохождения электронов до пересечения со средней линией шумового фона, учитывая, что пробег измеряется в единицах $L = h [\text{см}] \cdot \rho [\text{г/см}^3]$.
4. По зависимости практического пробега β -электронов от энергии определить максимальную энергию электронов и сравнить с заданной энергией, установленной при облучении бетатроном.
5. Полученные результаты измерения пространственного распределения электронов при прохождении через заданные материалы и в воздухе включить в программу «Grapher» и распечатать.
6. Воспроизвести на экране и затем распечатать кривые распределения электронов, полученные при прохождении малогабаритной ионизационной камеры горизонтально поперек пучка.
7. Определить и рассчитать по рисунку радиационного распределения углы рассеяния для заданных материалов и воздуха.
8. Написать выводы по каждой зависимости и полученным результатам измерений.

2.4.6. Контрольные вопросы

1. Каковы причины рассеяния электронов за фильтром при его прохождении?
2. При каком условии прохождения электронов через вещество возникает только тормозное излучение?
3. Что такое пробег электронов в веществе?

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – Изд. 3-е. – М.: Атомиздат, 1978.
2. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические свойства защиты от излучений. – Изд. 2-е / под ред. Н.Г. Гусева. – М.: Атомиздат, 1980.
3. Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ. Доклад 35 МКРЕ. – М., Энергоатомиздат, 1988.
4. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. – М.: Атомиздат, 1974.
5. Соболев М. Метод Монте-Карло: популярные лекции по математике. – Вып. 46. – М.: Наука, 1985.
6. Вентцель О.С. Теория вероятностей. – М.: ГИФМЛ, 1962.

2.5. Измерение активности источника ионизирующего излучения

2.5.1. Цели и задачи работы

При выполнении данной лабораторной работы преследуются следующие цели:

- закрепление материала по измерению радиоактивности и дозиметрии ионизирующего излучения;
- ознакомление с работой приборов для измерения мощности дозы гамма-излучения.

Основной задачей работы является установление зависимости мощности дозы от расстояния до источника, измерение мощности дозы и определение активности «точечного» источника гамма-излучения.

2.5.2. Теоретические сведения

Основной закон распада радиоактивных ядер

Ядра всех известных элементов в природе состоят из нуклонов – протонов и нейтронов, причем в определенном количественном соотношении. Если это соотношение нарушено, то ядро распадается с испусканием элементарных частиц и гамма-квантов по вероятностному закону:

$$N = N_0 \cdot \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где N_0 – число радиоактивных (нестабильных) ядер в момент времени $t = 0$; N – число оставшихся радиоактивных ядер в текущий момент времени t ; λ – постоянная распада для данного типа радиоактивных ядер.

$$\lambda = 0,693 / T,$$

T – период полураспада – промежуток времени, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается вдвое. Ядро после распада становится ядром изотопа другого элемента. Если количественное соотношение нуклонов в новом (дочернем) ядре также не соответствует соотношению стабильного состояния, то ядро продолжает распадаться до стабильного ядра.

Виды распада радиоактивных ядер

1. Альфа-распад:

Ядро испускает альфа-частицу (ядро гелия), дочернее ядро находится в возбужденном состоянии и при переходе в нормальное состояние испускает порцию энергии, т. е. генерирует гамма-квант. Дочернее ядро становится изотопом элемента с порядковым номером $z - 2$ и атомным весом $A - 4$.

2. Бета « \leftrightarrow » распад:

Ядро испускает бета-частицу (электрон) и антинейтрино; дочернее ядро – гамма-квант. Дочернее ядро становится изотопом элемента с порядковым номером $z + 1$ без изменения атомного веса.

3. Бета«+» – распад:

Ядро испускает бета-частицу (позитрон) и нейтрино, дочернее ядро – гамма-квант. Дочернее ядро становится изотопом элемента с порядковым номером $z - 1$ без изменения атомного веса.

4. Электронный захват:

Ядро захватывает электрон с ближайшей орбиты электронной оболочки атома, испускает нейтрино; дочернее ядро испускает гамма-квант. Дочернее ядро становится изотопом элемента с порядковым номером $z + 1$ без изменения атомного веса.

5. Самопроизвольное деление:

Ядро делится по вероятностному закону на две части, дочерние ядра испускают несколько нейтронов и гамма-кванты. Дочерние ядра становятся изотопами элементов с порядковыми номерами z_1 и z_2 и атомными весами A_1 и A_2 ($z_1 + z_2 = z$; $A_1 + A_2 = A$, где z , A – порядковый номер и атомный вес делящегося ядра).

Таким образом, при распаде радионуклиды превращаются в нуклиды других элементов, при этом испускается поток излучения в виде элементарных частиц и гамма-квантов, являющихся ионизирующим излучением.

Единицы измерения активности радионуклидов и их излучения

- Активность – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени. Единица активности в системе СИ 1 Беккерель = 1 распад в секунду. Внесистемная единица – 1 Кюри = $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду (Бк).

- Поглощенная доза – количество энергии ионизирующего излучения, переданное веществу. Единица поглощенной дозы 1 Грэй = доза поглощенной энергии излучения в 1 Джоуль в 1 кг массы облучаемого материала. Внесистемные единицы – Рад = 100 эрг/г, Рентген \sim Рад (1 Рад = 0,01 Грэй).

- Мощность поглощенной дозы излучения – доза за единицу времени. Единица мощности поглощенной дозы 1 Грэй/с = мощность поглощенной энергии излучения в 1 Джоуль в 1 кг массы облучаемого материала за 1 с.

- Эквивалентная доза – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения. Единица эквивалентной дозы 1 Зиверт = доза поглощенной энергии излучения в 1 Джоуль в 1 кг массы облучаемого материала с учетом качества излучения – характера воздействия типа излучения (частицы, гамма-кванты и их энергии) на биологическую ткань. Внесистемная единица – Бэр. (1 Бэр = 0,01 Зиверт).

- Плотность потока частиц. Число частиц, падающих на площадь в 1 см^2 за 1 с.

Связь между радиоактивностью источника и мощностью дозы его излучения

$$P = \gamma \cdot A / r^2, \quad (2)$$

где P – мощность дозы излучения; A – активность источника; γ – постоянная, зависящая от энергии частиц, гамма-квантов в излучении источника и его геометрии; r – расстояние между источником излучения и интересующей точкой в пространстве.

Зависимость мощности дозы излучения от расстояния до источника

$$P = \sim 1 / r^2, \quad (3)$$

$$P_1 / P_2 = (r_2 / r_1)^2, \quad (4)$$

где P_1, P_2 – мощности дозы в точках 1 и 2, удаленных от источника излучения на расстояния r_1, r_2 .

Согласно этому соотношению, мощность излучения от источника с расстоянием уменьшается пропорционально $1/r^2$ (условие выполняется, если r больше размера источника).

2.5.3. Измерение ионизирующего излучения

Измерение ионизирующего излучения основано на взаимодействии этого излучения с веществом – ионизации и возбуждении атомов. Детекторы излучения преобразуют энергию взаимодействия в электрические импульсы, количество и амплитуда которых пропорциональны дозе. Примером детекторов служат счетчики Гейгера–Мюллера, сцинтилляторы с ФЭУ и др.

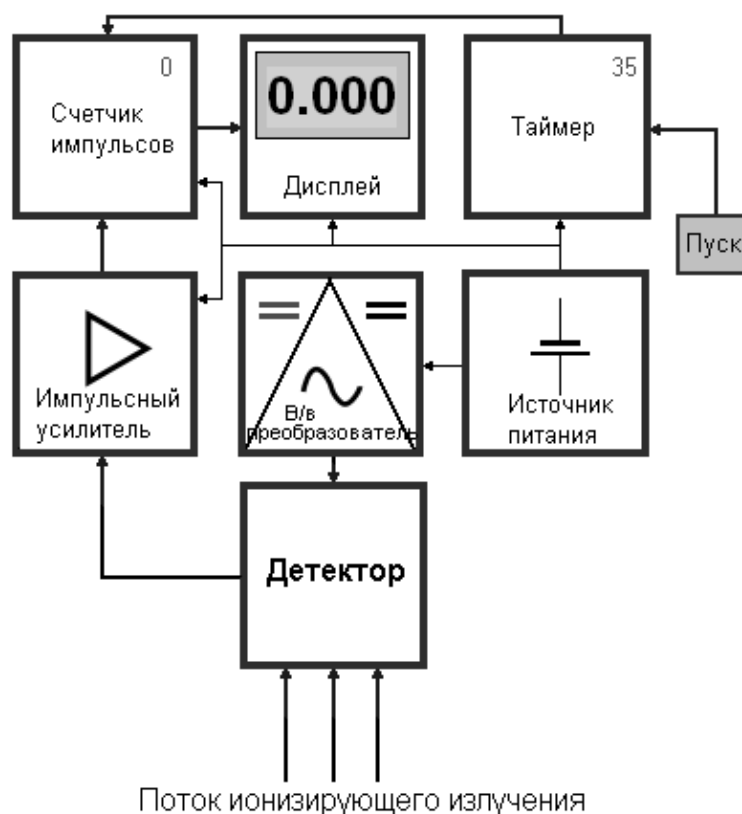


Рис. 2.5.1. Структура дозиметра

На рис. 2.5.1 представлена структурная схема дозиметра. Детектор регистрирует акты взаимодействия излучения с материалом детектора. Импульсы с детектора усиливаются по амплитуде и подаются на счетчик. По команде таймера счетчик начинает считать число импульсов. После окончания работы таймера, счет останавливается. Число при этом зарегистрированных счетчиком импульсов и является данными, характеризующими интенсивность излучения и его взаимодействие с веществом. В зависимости от типа детектора, вида излучения, с учетом соответствующих коэффициентов пропорциональности показания прибора выдаются в виде единиц измерения ионизирующего излучения. Прибор также содержит источник высокого напряжения для работы детектора.

2.5.4. Порядок выполнения лабораторной работы

В качестве источника излучения используется образцовый спектрометрический источник гамма-излучения Cs-137.



Рис. 2.5.2. Измерительная установка

Схематично установка показана на рис. 2.5.2. Источник помещен в свинцовый контейнер с открытой верхней крышкой. Дозиметр устанавливается на кронштейне, который может перемещаться по оси пучка излучения для измерений на разных расстояниях от источника. В качестве дозиметра используется дозиметр ДКГ-03Д.

Порядок выполнения работы

1. Установить дозиметр на кронштейн. Включить дозиметр, нажать кнопку «Пуск» и измерить фон в помещении.
2. Поместить «точечный» гамма-источник в контейнер.
3. Установить кронштейн с дозиметром на расстоянии r_1 от источника, провести измерения мощности дозы.
4. Установить кронштейн с дозиметром на расстоянии $r_2 = \dots$ см от источника, провести измерения мощности дозы.
5. Установить кронштейн с дозиметром на расстоянии $r_3 = \dots$ см от источника, провести измерения мощности дозы.
6. Построить кривую зависимости $(P - P_{\phi}) = f(r)$.

7. Рассчитать активность источника гамма-излучения по показаниям дозиметра:

$$A = (P - P_{\phi})r^2 / \gamma,$$

где P_{ϕ} – фон в помещении лаборатории.

Размерности: активность источника = [мКи], мощность дозы = [Р/ч], расстояние = [см], γ -постоянная = [Р·см² / (ч·мКи)]

Гамма-постоянная для Cs-137 $\gamma = 3,242 \text{ Р·см}^2 / (\text{ч·мКи})$.

1 мкЗв/ч $\sim 10^{-4}$ Р/ч, 1 мКи = 3,710⁷ Бк.

Результат вычислений представить в Беккерелях.

8. Рассчитать отношения показаний дозиметра и сравнить их с квадратами расстояний от местоположения дозиметра до источника излучения:

$$(P_1 - P_{\phi}) / (P_2 - P_{\phi}) \text{ с } (r_2 / r_1)^2;$$

$$(P_1 - P_{\phi}) / (P_3 - P_{\phi}) \text{ с } (r_3 / r_1)^2;$$

$$(P_2 - P_{\phi}) / (P_3 - P_{\phi}) \text{ с } (r_3 / r_2)^2.$$

9. Сделать выводы.

2.5.5. Вопросы к защите лабораторной работы

1. Радиоактивность, виды распада радионуклидов, основные законы.
2. Единицы измерения радиоактивности.
3. Работа дозиметра.
4. Ход выполнения работы. Результаты.

2.5.6. Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цели и задачи работы.
2. Радиоактивность, основные законы.
3. Описание работы дозиметра.
4. Описание измерительной установки и хода выполнения работы.
5. Формулы, вычисления, результаты.

2.5.7. Графический материал

1. Структурная схема дозиметра.
2. Измерительная установка.
3. Зависимость показаний дозиметра от расстояния до источника

2.6. Испытание строительных материалов на содержание радионуклидов

2.6.1. Цели и задачи работы

При выполнении данной лабораторной работы преследуются следующие цели:

- ознакомление с методикой проведения испытаний материалов на содержание естественных и техногенных радионуклидов;
- ознакомление с работой гамма-спектрометра;
- овладение методикой обработки и расшифровки линейчатых гамма-спектров с использованием компьютерной программы;
- ознакомление с ролью естественных радионуклидов во внешнем радиационном фоне среды обитания человека.

Основной задачей работы является определение эффективной активности радионуклидов естественного происхождения, присутствующих в грунте, строительных материалах, для чего необходимо проведение гамма-спектрометрического анализа, идентификации радионуклидов в испытываемом материале. Это позволяет на данном примере ознакомиться с одним из методов радиационного контроля материалов, который применяется при сертификации строительных материалов и экологическом контроле, а также при контроле продуктов деления в атомной промышленности, нейтронно-активационном анализе материалов и других областях науки и техники.

2.6.2. Теоретические сведения

Естественные радионуклиды

Одним из факторов отрицательного воздействия окружающей среды на человека является ионизирующее излучение. Это космическое излучение, ионизирующее излучение Солнца, излучение космогенных, техногенных радионуклидов и радионуклидов земного происхождения, а также излучение видеомониторов, телевизоров, электрофизических и изотопных установок медицинского и промышленного назначения.

Основной вклад в радиационный фон ионизирующего излучения среды обитания человека вносят естественные радионуклиды земного происхождения, находящиеся в почве, грунте и материалах, извлеченных из земли и изготовленных на их основе. К ним относятся песок, глина, щебень, полезные ископаемые, кирпич, бетон и т. п. В состав таких материалов входят 23 радиоактивных изотопа. Из них наиболее значимые радиоактивные изотопы урана – U^{238} , U^{235} , тория – Th^{232} и калия – K^{40} . Периоды полураспада этих изотопов составляют миллиарды лет и существуют они со времени образования нашей солнечной системы.

Периоды полураспада $T_{1/2}$:

$\text{Th}^{232} - 14,05 \cdot 10^9$ лет;

$\text{U}^{235} - 0,704 \cdot 10^9$ лет;

$\text{U}^{238} - 4,468 \cdot 10^9$ лет;

$\text{K}^{40} - 1,262 \cdot 10^9$ лет.

Процентное содержание данных изотопов в элементах – уране, тории и калии:

$\text{U}^{238} - 99,3 \%$; $\text{U}^{235} - 0,7 \%$; $\text{Th}^{232} - 100,0 \%$; $\text{K}^{40} - 0,0118 \%$.

Последнее, касательно элемента калия, означает, что в любом химическом соединении с калием присутствует радиоактивный изотоп K^{40} , имеющий одинаковые химические свойства со стабильными изотопами K^{39} (93,08 %) и K^{41} (6,91 %).

Изотопы урана, тория, калия широко распространены на Земле и обнаруживаются в любом земном объекте, включая растительный и животный миры.

Среднее содержание данных изотопов в земле варьируется в пределах: $\text{U}^{238} - 0,8 \dots 4,1$ г/т; $\text{U}^{235} - 0,006 \dots 0,03$ г/т; $\text{Th}^{232} - 1,8 \dots 11,6$ г/т; $\text{K}^{40} - 0,4 \dots 2,6$ г/т.

Места, где эти концентрации по отдельным изотопам превышают указанные в сотни, тысячи раз, считаются месторождениями.

K^{40} при распаде превращается в стабильные изотопы Ar^{40} (10,67 %) и Ca^{40} (89,33 %), а U^{238} , U^{235} , Th^{232} через ряд промежуточных превращений – в стабильные изотопы Pb^{206} (100 %), Pb^{207} (100 %), Pb^{208} (100 %), соответственно. То есть, радионуклиды U^{238} , U^{235} , Th^{232} образуют семейства радиоактивных, сравнительно короткоживущих дочерних радионуклидов. Там, где в земле имеются эти радионуклиды, практически всегда присутствуют дочерние радионуклиды:

$\text{U}^{238} \rightarrow \text{Th}^{234}, \text{Pa}^{234}, \text{U}^{234}, \text{Th}^{230}, \text{Ra}^{226}, \text{Rn}^{222}, \text{Po}^{218}, \text{Pb}^{214}, \text{Bi}^{214}, \text{Po}^{214}, \text{Pb}^{210}, \text{Bi}^{210}, \text{Po}^{210}$;

$\text{U}^{235} \rightarrow \text{Th}^{231}, \text{Pa}^{231}, \text{Ac}^{227}, \text{Th}^{227}, \text{Ra}^{223}, \text{Ra}^{219}, \text{Po}^{215}, \text{Pb}^{211}, \text{Bi}^{211}, \text{Tl}^{207}, \text{Po}^{210}$;

$\text{Th}^{232} \rightarrow \text{Ra}^{228}, \text{Ac}^{228}, \text{Th}^{228}, \text{Ra}^{224}, \text{Rn}^{220}, \text{Po}^{216}, \text{Pb}^{212}, \text{Bi}^{212}, \text{Po}^{212}, \text{Tl}^{208}$.

Цепочки распада урана и тория представлены на рис. 2.6.1.

Материнские и дочерние радионуклиды распадаются по альфа- или бета-типу. При этом излучается целый спектр альфа-, бета- и гамма-частиц, представляющий собой ионизирующее излучение, которое и формирует радиационный фон в окружающей нас среде. В зависимости от содержания (активности) K^{40} , U^{238} , U^{235} , Th^{232} , радиационный фон может варьироваться в больших пределах и превышать предельно допустимые уровни. Поэтому, прежде чем использовать грунт, песок, глину, щебень и материалы ископаемого происхождения в строительстве или в промышленности, эти материалы должны пройти испытания на содержание естественных радионуклидов.

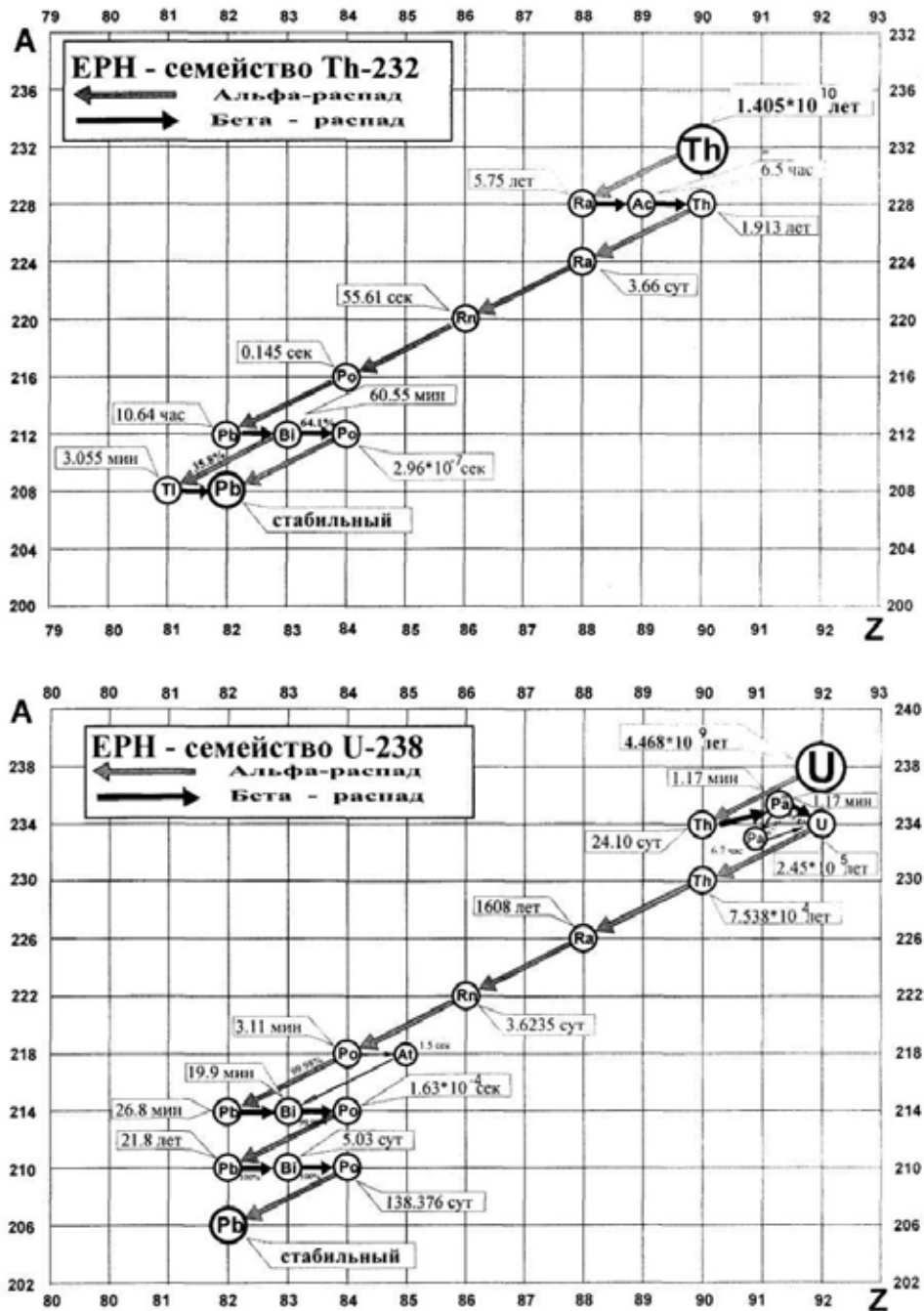


Рис. 2.6.1. Цепи распада Th-232 и U-238

Критерии оценки содержания естественных радионуклидов в строительных материалах

Согласно ГОСТ 30106-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов», – грунт, материалы из сырья земного происхождения делятся на четыре класса радиационной опасности (см. табл. 2.6.1). В качестве критерия используется значение удельной эффективной активности:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31 \cdot A_{\text{Th}} + 0,085 \cdot A_{\text{K}}, \text{ [Бк/кг]}. \quad (1)$$

Здесь A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} – удельные активности радионуклидов Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} , дающих, с учетом излучения их дочерних радионуклидов, наиболее существенный вклад в формирование дозы облучения человека от испытываемого материала.

За результат $A_{\text{эфф класс}}$ естественных радионуклидов в контролируемом материале для установления класса материала принимают значение, определяемое по формуле:

$$A_{\text{эфф класс}} = A_{\text{эф}} + \Delta, \quad (2)$$

где Δ – абсолютная ошибка определения $A_{\text{эфф}}$

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{Ra}}^2 + 1,7\Delta_{\text{Th}}^2 + 0,007\Delta_{\text{K}}^2}, \text{ Бк/кг}, \quad (3)$$

где Δ_{Ra} , Δ_{Th} , Δ_{K} – соответственно, абсолютные ошибки определения активностей A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} .

Таблица 2.6.1

Классы строительных материалов по содержанию естественных радионуклидов

Удельная эффективная активность ($A_{\text{эфф}}$), Бк/кг	Класс материала	Область применения
до 370	I	Все виды строительства
от 370 до 740	II	Дорожное строительство в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, строительство производственных сооружений
от 740 до 1350	III	Дорожное строительство вне населенных пунктов
свыше 1350	IV	Вопрос об использовании материала решается по согласованию с Госкомсанэпиднадзором (Роспотребнадзором)

Гамма-спектрометрический анализ материалов

Активности радионуклидов Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} в испытываемом материале определяют с помощью гамма-спектрометров. Используется тот факт, что при альфа- и бета-распаде практического большинства известных радионуклидов излучаются гамма-кванты строго определенных энергий. Измерив спектр гамма-квантов, можно идентифицировать радионуклиды, находящиеся в испытуемом материале, и определить их активности (см. рис. 2.6.4).

В настоящее время для гамма-спектрометрического анализа радионуклидного состава материала широко используются гамма-спектрометры с полупроводниковым детектором, имеющим высокую разрешающую способность получаемых гамма-спектров излучения радионуклидов. На рис. 2.6.2 представлена блок-схема полупроводникового гамма-спектрометра. Алгоритм выполнения операций на нем следующий:

1. Пробоподготовка – измельчение исследуемого материала до гранул диаметром не более 5 мм.
2. Заполнение кюветы (сосуд Маринелли) объемом 1 л испытываемым материалом.
3. Взвешивание содержимого кюветы – определение массы навески.
4. Помещение кюветы в измерительную камеру с радиационной защитой от внешнего фона.
5. Набор гамма-спектра.
6. Обработка, расшифровка спектра с использованием специальной компьютерной программы.
7. Вычисление активности обнаруженных радионуклидов.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

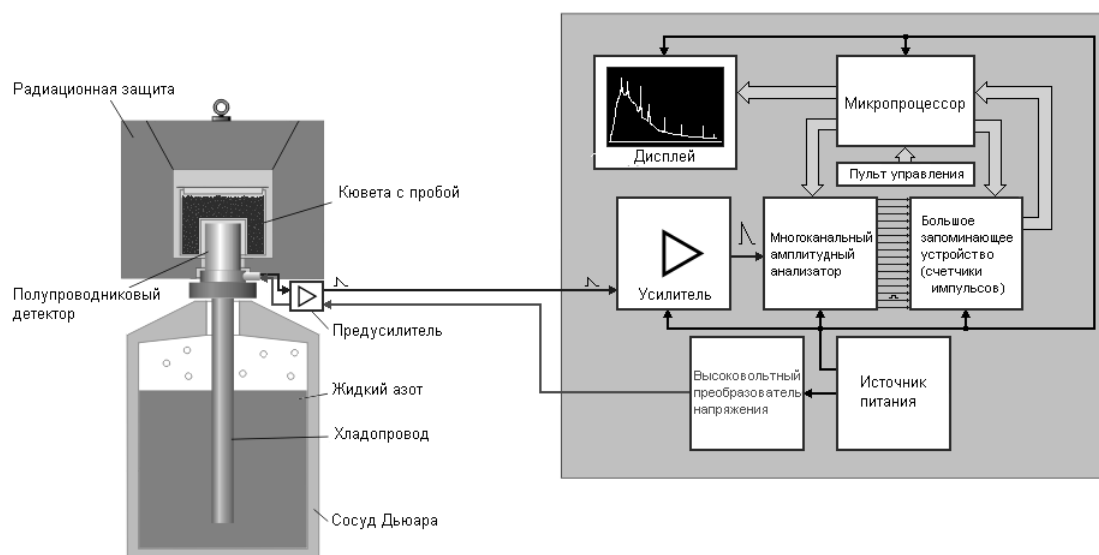


Рис. 2.6.2. Блок-схема гамма-спектрометра

Гамма-кванты, возникающие при распаде радионуклидов в испытываемом материале, регистрируются детектором (для получения наилучших характеристик по разрешающей способности детектор охлаждается жидким азотом). Электрические импульсы с детектора усиливаются по амплитуде предусилителем и основным импульсным усилителем. Далее они поступают на многоканальный амплитудный анализатор, где производится анализ импульсов по амплитуде. Число каналов, амплитудных «ворот» достигает обычно несколько тысяч. К выходу каждого канала подключен счетчик объемом до 10^6 импульсов. Если амплитуда импульса соответствует амплитудному диапазону какого-либо канала, то срабатывает счетчик этого канала. С периодичностью (1–5) с микропроцессор опрашивает состояния счетчиков и выводит информацию на графический дисплей. Здесь ось X – ось амплитуд импульсов

(каналов), ось Y – числа импульсов в каждом канале. Таким образом, в процессе испытания, т. е. набора спектра, на экране регистрируется гистограмма – амплитудный спектр. Поскольку амплитуда импульсов с детектора пропорциональна энергии регистрируемых гамма-квантов, а ось X может быть откалибрована в единицах энергии (кэВ), гистограмма на экране является гамма-спектром излучения радионуклидов, находящихся в испытываемом материале.

Кроме указанных устройств, в спектрометре также имеется источник высоковольтного напряжения, блок питания и устройства связи спектрометра с компьютером.

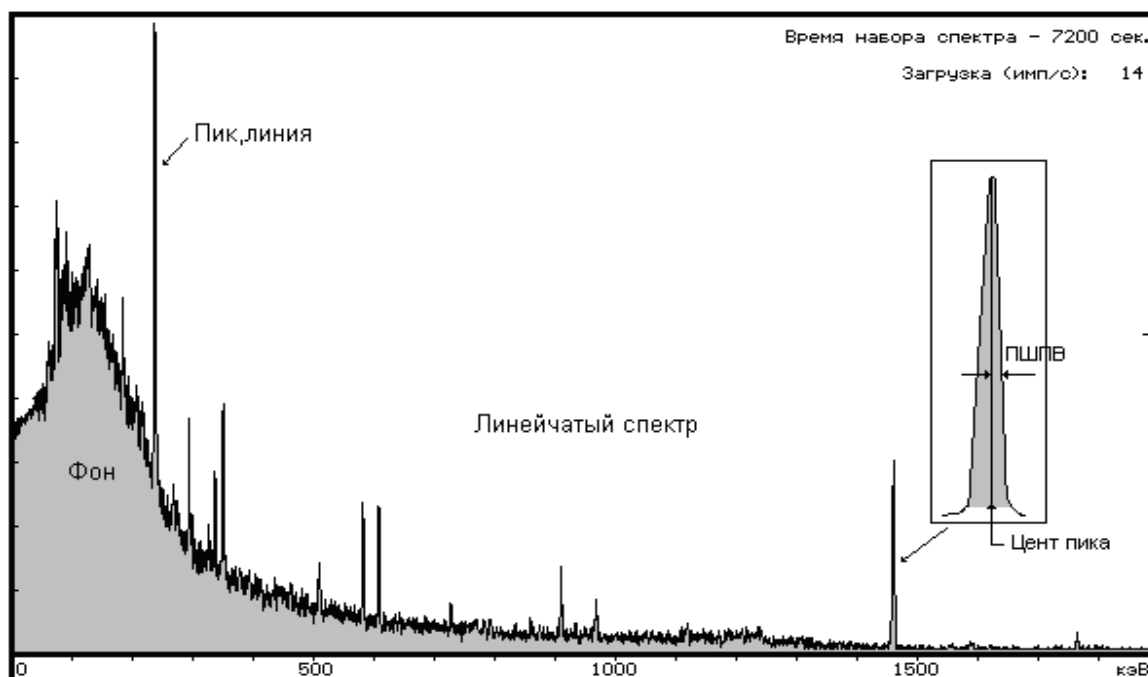


Рис. 2.6.3. Гамма-спектр.

Вид спектра и фона определяется более высокой чувствительностью детектора в области низких энергий гамма-квантов и комтоновским рассеянием гамма-квантов

На экране дисплея мы наблюдаем плавную кривую фона рассеянных гамма-квантов и наложенный на нее линейчатый спектр гамма-квантов, поглощенных в первом же акте взаимодействия с детектором (рис. 2.6.3). Линейчатый спектр не идеальный, при укрупненном рассмотрении представляет собой набор размытых колоколообразных формирований, занимающих несколько каналов. Это связано со статической природой взаимодействия гамма-квантов с материалом детектора. Поэтому каждому полностью поглощенному в детекторе гамма-кванту одной и той же энергии соответствует на выходе импульс с амплитудой, несколько отличающейся от среднего значения для большого массива зарегистрированных гамма-квантов, что приводит к раз-

мытию пика по ширине (ПШПВ-полуширина на полувысоте, характеризует разрешающую способность спектрометра, различимость от близлежащих пиков). Образование фоновой кривой связано с комптоновским рассеянием гамма-квантов, т. е., если при поглощении гамма-кванта в детекторе за счет фотоэффекта амплитуда импульса соответствует энергии кванта, то при комптоновском рассеянии только статистически неопределенная часть энергии кванта регистрируется в детекторе, остальная часть энергии уносится из детектора гамма-квантом меньшей энергии. Это является мешающим фактором для спектрального анализа, особенно в области малых энергий гамма-квантов. Диапазон энергий гамма-квантов, регистрируемых спектрометром, составляет обычно (50...3000) кэВ и охватывает практически весь диапазон энергий гамма-квантов, излучаемых известными в природе радионуклидами.

После набора спектра, продолжительность которого зависит от требуемой статистической погрешности, числовой массив спектра перекачивается из большого запоминающего устройства спектрометра на жесткий диск компьютера. По команде оператора компьютерная программа далее производит поиск пиков, линий, обработку и расшифровку спектра. Предварительно калибруется энергетическая шкала – ось X. Вычисляются площади пиков за вычетом фона под пиками. Определяются интенсивности пиков, линий:

$$I_i = S_i / T,$$

где S_i и T – площадь i -го пика (число зарегистрированных импульсов в пике) и время набора спектра.

Далее спектр сравнивается с библиотекой гамма-линий, записанной в файл компьютера (см. рис. 2.6.4), производится идентификация радионуклидов по обнаруженным пикам в спектре, вычисляются активности радионуклидов и погрешности их определения:

$$A_{i, \text{нук}} = I_i / (\eta \varepsilon),$$

где η – эффективность регистрации детектора, зависящая от энергии гамма-квантов и плотности испытываемого материала; ε – выход гамма-линии при распаде данного радионуклида.

Поскольку при распаде радионуклида может быть испущено несколько гамма-квантов разных энергий, то активность радионуклида усредняется по активностям, вычисленным по пикам этих линий с учетом погрешностей их определения.

Задача оператора заключается, в конечном итоге, в выработке решения: принять предлагаемые компьютером результаты анализа или произвести их коррекцию на основании своего опыта и знаний.

В данной лабораторной работе используется гамма-спектрометр «РАДЭК». В состав спектрометра входят:

- блок детектирования гамма-излучения – ДГДК-100;
- предусилитель ПУ-Г-1К2;
- спектрометрический усилитель БУИ-3К;
- анализатор многоканальный амплитудный АМА-03Ф;
- высоковольтный блок питания БНВ-3;
- блок питания БНН-08Ф;
- пульт управления;
- видеоконтрольное устройство;
- персональный компьютер.

Спектрометр управляется компьютерной программой «Aligas» версии 2.22, при этом пульт управления не используется.

«Aligas» обеспечивает все необходимые для гамма-спектрометрии режимы работы:

- управление анализатором (задание параметров, запуск и останов набора, считывание спектра из памяти анализатора, запись спектра на диск, повторный запуск и т. д.);
- просмотр спектра на экране компьютера;
- распечатку спектра (или его участков) на принтере;
- настройку режима обработки спектра с учетом специфики набранного спектра;
- автоматический поиск пиков и определение их площадей;
- проведение энергетической калибровки;
- идентификацию радионуклидов;
- расчет полной или удельной активности радионуклидов (с возможностью усреднения результатов по серии пиков, принадлежащих идентифицированному радионуклиду);
- документирование результатов анализа на принтере и/или на диске (дискете).

2.6.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Набор спектра
 - 1.1. Включение гамма-спектрометра.
 - 1.2. Подъем высокого напряжения на детекторе.
 - 1.3. Наполнение измерительной кюветы испытываемым материалом.
 - 1.4. Взвешивание содержимого кюветы на электронных весах.
 - 1.5. Установка кюветы на детектор (в радиационную защиту).
 - 1.6. Запуск компьютерной программы «Aligas».

- 1.7. Занесение в программу информации об испытываемом материале-пробе (требуемое время набора спектра T , сек, вес пробы $m_{\text{пробы}}$ в кг, наименование материала, дата взятия пробы, дата проведения анализа).
- 1.8. Запуск набора спектра.
- 1.9. Включение визуализации набора спектра на видеоконтрольном устройстве анализатора.
- 1.10. Набор спектра в течение установленного времени.
- 1.11. Автоматическая остановка набора спектра.
- 1.12. Вывод числового массива спектра из анализатора в компьютер (запись в файл спектра и информационный) и на экран компьютера.
- 1.13. Предварительное визуальное изучение спектра.
- 1.14. Выход из программы.
2. Обработка спектра
 - 2.1. Вход в программу «Aligas».
 - 2.2. Ввод требуемых файлов числового и информационного набранного спектра.
 - 2.3. Ввод кривой эффективности, соответствующей плотности пробы.
 - 2.4. Ввод данных из файла библиотеки гамма-линий радионуклидов.
 - 2.5. Ввод даты, по отношению к которой надо вычислить активности обнаруженных радионуклидов.
 - 2.6. Автоматический поиск пиков в спектре.
 - 2.7. Наблюдение спектра и определение номеров каналов центров трех известных пиков.
 - 2.8. Калибровка спектра.
 - 2.9. Полная автоматическая обработка спектра.
 - 2.10. Отбраковка результатов расчетов активностей по малоинформативным пикам (статистическая погрешность более 50 %) и ошибочным пикам, предложенным программой из библиотеки радионуклидов.
 - 2.11. Вычисление усредненных удельных активностей обнаруженных радионуклидов и их погрешностей, запись в файл обработки спектра.
 - 2.12. Печать спектра и нанесение наименований радионуклидов на пики вручную согласно библиотеке гамма-линий естественных радионуклидов (рис. 2.6.4).

Линия	Выход	Нуклид	Семейство	Линия	Выход	Нуклид	Семейство
39.8	1.0	Bi-212	Торий	661.6	89.9	Cs-137	цезий
46.5	4.0	Pb-210	Уран	665.4	1.7	Bi-214	Уран
53.2	1.1	Pb-214	Уран	727.1	11.8	Bi-212	Торий
63.3	4.6	Th-234	Уран	755.2	1.0	Ac-228	Торий
74.8	6.2	Pb-214	Уран	766.3	0.2	Th-234	Уран
74.8	10.6	Pb-212	Торий	768.4	4.9	Bi-214	Уран
74.9	1.2	Tl-208	Торий	772.1	1.5	Ac-228	Торий
77.1	10.4	Pb-214	Уран	785.4	1.9	Bi-212	Торий
77.1	18.0	Pb-212	Торий	785.9	0.9	Pb-214	Уран
87.3	4.6	Pb-214	Уран	794.7	4.6	Ac-228	Торий
87.3	8.0	Pb-212	Торий	806.2	1.2	Bi-214	Уран
89.9	2.1	Ac-228	Торий	835.5	1.7	Ac-228	Торий
92.6	5.2	Th-234	Уран	839.1	0.6	Pb-214	Уран
93.3	3.4	Ac-228	Торий	840.0	0.9	Ac-228	Торий
99.4	1.3	Ac-228	Торий	860.6	4.4	Tl-208	Торий
105.0	1.6	Ac-228	Торий	911.1	27.7	Ac-228	Торий
129.0	2.7	Ac-228	Торий	934.1	3.2	Bi-214	Уран
143.9	0.6	U-235	Уран	947.7	4.1	Ac-228	Торий
154.2	0.9	Ac-228	Торий	964.6	5.5	Ac-228	Торий
185.7	2.2	U-235	Уран	968.9	17.3	Ac-228	Торий
186.1	3.7	Ra-226	Уран	1001.0	0.6	Th-234	Уран
209.2	4.4	Ac-228	Торий	1078.6	0.9	Bi-212	Торий
236.0	0.4	U-235	Уран	1120.3	15.0	Bi-214	Уран
238.6	44.6	Pb-212	Торий	1155.2	1.7	Bi-214	Уран
241.9	7.5	Pb-214	Уран	1238.1	5.9	Bi-214	Уран
258.8	0.8	Pb-214	Уран	1280.9	1.5	Bi-214	Уран
270.2	3.6	Ac-228	Торий	1377.7	4.0	Bi-214	Уран
270.3	0.9	U-235	Уран	1385.3	0.8	Bi-214	Уран
277.3	2.4	Tl-208	Торий	1401.5	1.4	Bi-214	Уран
295.2	18.9	Pb-214	Уран	1407.9	2.5	Bi-214	Уран
300.0	3.4	Pb-212	Торий	1459.3	0.9	Ac-228	Торий
327.6	3.2	Ac-228	Торий	1460.8	10.7	K-40	калий
338.4	12.4	Ac-228	Торий	1495.8	0.9	Ac-228	Торий
351.0	0.5	U-235	Уран	1509.2	2.2	Bi-214	Уран
351.9	36.3	Pb-214	Уран	1583.2	0.7	Bi-214	Уран
409.5	2.1	Ac-228	Торий	1588.0	3.5	Ac-228	Торий
463.0	4.4	Ac-228	Торий	1592.7	E-Eo	Tl-208	Торий
477.6	10.4	Be-7	бериллий	1620.6	2.7	Bi-212	Торий
510.8	7.7	Tl-208	Торий	1630.4	1.8	Ac-228	Торий
562.3	0.9	Ac-228	Торий	1661.3	1.1	Bi-214	Уран
583.1	30.5	Tl-208	Торий	1729.6	2.9	Bi-214	Уран
609.3	46.1	Bi-214	Уран	1764.5	15.9	Bi-214	Уран

Рис. 2.6.4. Гамма-линии естественных радионуклидов

3. Вычисление эффективной активности испытываемого материала:

3.1. Чтение из файла обработки спектра измеренных значений активностей $A_{Ra \text{ изм}}$, $A_{Th \text{ изм}}$, $A_{K \text{ изм}}$ обнаруженных естественных радионуклидов и статистических погрешностей их определения $\sigma_{Ra \text{ ст}}$, $\sigma_{Th \text{ ст}}$, $\sigma_{K \text{ ст}}$ в процентах.

3.2. Вычитание фона $A_{Ra \text{ фон}}$, $A_{Th \text{ фон}}$, $A_{K \text{ фон}}$:

$$A_{Ra} = (A_{Ra \text{ изм}} \cdot m_{\text{пробы}} - A_{Ra \text{ фон}}) / m_{\text{пробы}};$$

$$A_{Th} = (A_{Th \text{ изм}} \cdot m_{\text{пробы}} - A_{Th \text{ фон}}) / m_{\text{пробы}};$$

$$A_K = (A_{K \text{ изм}} \cdot m_{\text{пробы}} - A_{K \text{ фон}}) / m_{\text{пробы}}$$

(принять $A_{Ra \text{ фон}} = 1,9$ Бк, $A_{Th \text{ фон}} = 2,7$ Бк, $A_{K \text{ фон}} = 129$ Бк).

3.3. Вычисление $A_{эфф}$ по формуле (1).

3.4. Вычисление полных погрешностей – статистических плюс методических:

$$\Delta_{Ra} = A_{Ra} (\sigma_{Ra \text{ ст}} + \sigma_{\text{мет}}) / 100;$$

$$\Delta_{Th} = A_{Th} (\sigma_{Th \text{ ст}} + \sigma_{\text{мет}}) / 100;$$

$$\Delta_K = A_K (\sigma_{K \text{ ст}} + \sigma_{\text{мет}}) / 100,$$

$\sigma_{\text{мет}}$ – методическая погрешность анализа (принять равной 10 %).

3.5. Вычисление Δ – абсолютной ошибки определения $A_{эфф}$ по формуле 3.

4. Выводы по результатам испытаний.

4.1. Определение класса материала по содержанию естественных радионуклидов $A_{эфф \text{ класс}}$ по формуле 2.

2.6.4. Вопросы к защите лабораторной работы

1. Естественные радионуклиды, семейство урана – U^{238} , тория – Th^{232} .
2. Классы строительных материалов по содержанию естественных радионуклидов.
3. Принцип работы гамма-спектрометра.
4. Порядок испытания материалов на спектрометре.
5. Обработка полученного гамма-спектра.
6. Определение класса материала по содержанию естественных радионуклидов.

2.6.5. Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цели и задачи работы.
2. Содержание ГОСТ на классификацию материалов по содержанию естественных радионуклидов (табл. 2.6.1, критерий – $A_{эфф}$, формулы).
3. Описание хода выполнения лабораторной работы (материал для испытания, тип спектрометра и программного обеспечения, порядок проведения анализа на спектрометре, набор спектра, обработка спектра, распечатка спектра, идентификация радионуклидов по спектру).
4. Вычисление $A_{эфф}$, погрешностей и $A_{эфф \text{ класс}}$.
5. Заключение (определение класса материала, выводы).

2.6.6. Графический материал

1. Гамма – линии естественных радионуклидов.
2. График спектра с идентифицированными пиками радионуклидов.

Список использованных источников

1. Баранов В.И., Сердюкова А.С., Горбушина Л.В., Назаров И.М., Ефимкина З.М. Лабораторные работы и задачи по радиометрии. – М.: Атомиздат, 1968 – 220 с.
2. Чирков Е.П., Белан Л.Г., Голубов Г.В., Журбенко Н.С., Кольцова Е.А., Меркина Т.С., Огородникова Н.Г., Титова Г.М., Уваров И.П. Изотопная продукция. – М.: Атомиздат, 1988.– 220 с.
3. Бочкарев В.В. Техника измерений радиоактивных препаратов. – М.: Госатомиздат, 1962. – 215 с.
4. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 240 с.
5. Ардашников С.Н., Голблин С.М., Николаев А.В., Рузер Л.С., Цен-тер Э.М. Защита от радиоактивных излучений – М.: Metallurgizdat, 1961. – 420 с.

2.7. Изучение рентгеновского аппарата РАП-160

2.7.1. Цель работы

Целью данной лабораторной работы является изучение устройства и работы аппарата, правил обращения с ним и указаний по техническому обслуживанию, транспортированию и хранению. При изучении устройства аппарата и правил его эксплуатации следует дополнительно руководствоваться паспортом и инструкцией по эксплуатации рентгеновской трубки 0,8 БПМ 14-160.

2.7.2. Общие сведения

1. Основным назначением аппарата является неразрушающий контроль изделий, материалов, сварных соединений направленным пучком рентгеновского излучения в условиях производственных цехов, строительных и монтажных площадок.

Кроме этого, аппарат может быть использован и для других целей, где требуется пучок рентгеновского излучения с максимальной энергией до 160 кэВ.

2. Аппарат генерирует рентгеновское излучение импульсами длительностью около $2 \cdot 10^{-4}$ секунд, с регулируемой частотой от 100 до 750 Гц.

2.7.3. Технические характеристики

1. Аппарат питается от сети переменного однофазного напряжения 220 В.

2. В аппарате предусмотрены два режима управления.

2.1. Внутреннее управление – режим получения обычных рентгеновских снимков. Включение излучения производится оператором с пульта управления, при этом осуществляется плавный подъем высокого напряжения на рентгеновской трубке.

2.2. Внешнее управление – режим рентгеновской цифровой фотографии. После выполнения оператором всех подготовительных операций включение излучения осуществляется по сигналу внешнего устройства. Активным является низкий уровень входного напряжения, когда управляющий провод замыкается внешним устройством на общий провод. В этом режиме обеспечивается ускоренный выход аппарата на установленные параметры по току и напряжению.

3. Максимальное напряжение на аноде 160 кВ. Пределы регулирования анодного напряжения от 40 до 160 кВ через 1 кВ.

4. Максимальный средний ток анода 5 мА. Ток регулируется дискретно через 0,1 мА. Пределы регулировки даны в табл. 2.7.1.

Таблица 2.7.1

Пределы регулировки параметров аппарата РАП-160

Высокое напряжение, кВ	41–49	50–59	60–69	70–79	80–89	90–99
Минимальный анодный ток, мА	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
Максимальный анодный ток, мА	3,5	4,0	4,3	4,5	4,7	4,8
Высокое напряжение, кВ	100–109	110–119	120–129	130–139	140–149	150–159
Минимальный анодный ток, мА	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Максимальный анодный ток, мА	4,8	5,0	5,0	4,5	4,0	3,5

5. Устанавливаемое время экспозиции – от 1 с до 9999 с через 1 с.

6. Размеры фокусного пятна: 1,2 × 1,2 мм.

7. Угол выхода излучения – 40°.

8. Максимальная мощность на аноде трубки, равная произведению анодного напряжения на средний анодный ток, не более 645 Вт.

9. Напряжение питания однофазной сети переменного тока 220 В / 50(60) Гц.

10. Активная мощность, потребляемая от сети однофазного тока частотой 50 Гц при напряжении 220 В с допускаемыми отклонениями 10 %, не более 1,0 кВт.

Полная мощность, потребляемая от сети, не более 1,7 кВА.

11. Мощность экспозиционной дозы при анодном напряжении 160 кВ и токе анода 3,5 мА на расстоянии 0,5 м от выходного окна, не менее 16 Р/мин.

12. Длительности работы и паузы зависят от мощности, выделяемой на аноде трубки и условий охлаждения. Режимы работы:

при включенном вентиляторном блоке:

- непрерывная работа при мощности анода не более 300 Вт;
- 5 мин работы, 5 мин перерыв при мощности анода 600 Вт;

при отключенном вентиляторном блоке или его отсутствии:

- непрерывный режим при мощности анода не более 150 Вт;
- 5 мин работы, 30 мин перерыв при мощности анода 600 Вт.

Примечание. Мощность анода определяется как произведение значения высокого напряжения на анодный ток.

Встроенная схема измерения температуры позволяет, в случае необходимости, корректировать рабочий цикл.

13. Скорость подъема высокого напряжения $20 \text{ кВ}\cdot\text{с}^{-1}$.

14. Условия эксплуатации:

- рабочая температура: от $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- относительная влажность при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до 90 %.

15. Массогабаритные характеристики приведены в табл. 2.7.2.

Таблица 2.7.2

Массогабаритные характеристики аппарата РАП-160

	Габаритные размеры, мм			Масса, кг, не более
	длина	ширина	высота	
Излучатель с вентиляторным блоком	320	200	390	16
Излучатель без вентиляторного блока	300	200	390	14
Блок питания с ручками	305	260	210	6,3
Пульт управления	175	80	30	0,3

16. Длина соединительных кабелей, м:

- блок питания – излучатель – 7;
- блок питания – пульт управления – 20;
- сетевой шнур – 7.

2.7.4. Состав изделия аппарата

Аппарат состоит из трех блоков: излучателя с навесным вентиляторным блоком, блока питания и пульта управления.

При работе блоки соединяются между собой электрическими кабелями. Вентиляторный блок питается напряжением 14 В и подключается к отводу силового кабеля. Схема соединений приведена на рис. 2.7.1.

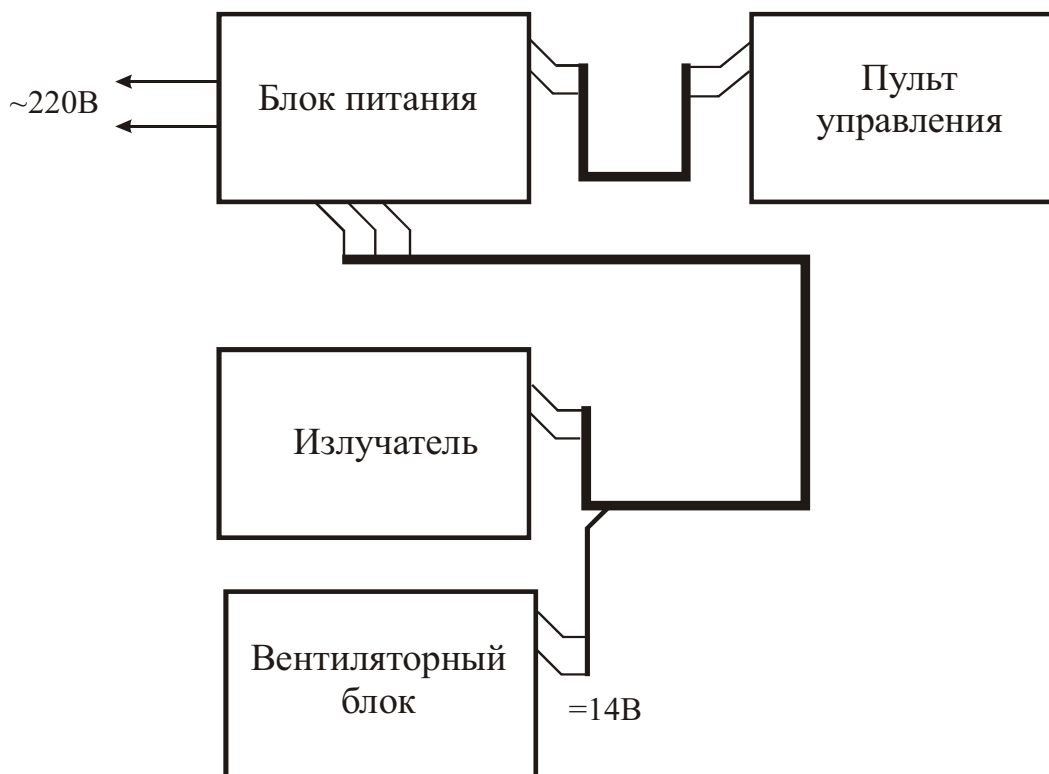


Рис. 2.7.1. Состав и схема соединений рентгеновского аппарата РАП 160-5

2.7.5. Принцип работы и устройство аппарата

В аппаратах серии РАП применена так называемая частотно-импульсная схема силового питания рентгеновской трубки. На электроды трубки с главного трансформатора подаются силовые высоковольтные импульсы длительностью (250...400) мкс и частотой до 750 Гц. Форма импульсов приближена к прямоугольной, с длительностью фронтов (20–25) %. Выбранный режим питания рентгеновской трубки весьма благоприятен для её долговечности. На трубку подаются высоковольтные импульсы, имеющие скважность 6–8.

Такая схема питания обеспечивает снижение размеров и массы излучателя, увеличение рентгеновской отдачи по сравнению с полуволновой схемой и повышение устойчивости работы трубки за счет существенного снижения на ней обратного напряжения.

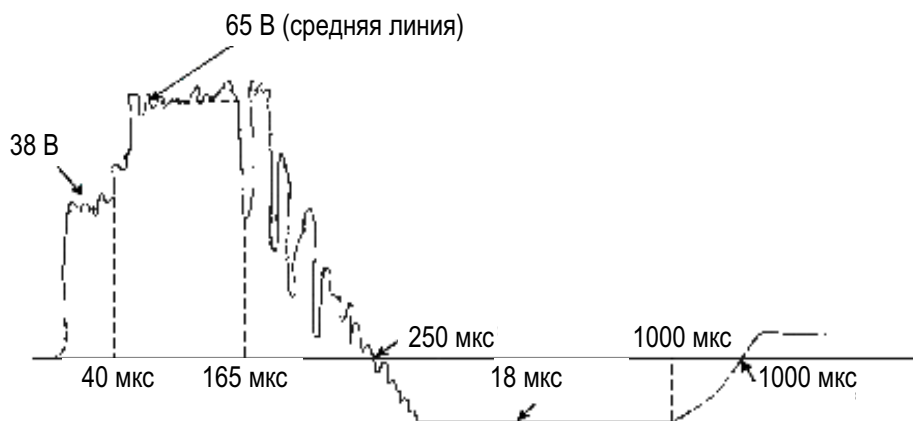


Рис. 2.7.2. РАП-160. Импульс высокого напряжения с контрольного гнезда U_a блока питания. $U_a = 120 \text{ кВ}$, $I_a = 2 \text{ мА}$.

По разрешающей способности, чувствительности контроля и просвечиваемой толщине дефектоскопия с использованием портативных моноблочных рентгеновских аппаратов РАП-160, РАП100-10, РАП220-5 и др. существенно превосходит импульсные аналоги, например, такие, как «АРИНА» и «ШМЕЛЬ».

Регулирование анодного напряжения на трубке осуществляется за счет изменения напряжения питания ключевого преобразователя. Для получения регулируемого постоянного напряжения в аппарате используется широтно-импульсный модулятор.

Регулирование анодного тока в аппарате может производиться за счет изменения частоты следования высоковольтных импульсов или изменением напряжения накала катода рентгеновской трубки.

Излучатель

- Излучатель содержит рентгеновскую трубку, высоковольтный импульсный трансформатор, схему рекуперации реактивной энергии, накапливаемой к концу импульса в трансформаторе, высоковольтный трансформатор накала, ограничитель напряжения измерительной цепи тока трубки при ее пробоях, датчик температуры, а также электродвигатель с крыльчаткой для прокачки масла.

- Полное напряжение на рентгеновской трубке складывается из двух примерно одинаковых по форме импульсных напряжений, формируемых анодной и катодной катушками. Эти катушки расположены на разных сердечниках одного магнитопровода и содержат первичные обмотки, обмотки рекуперации, измерительные обмотки и высоковольтные обмотки.

- После формирования прямой волны за счет ЭДС самоиндукции трансформатора напряжение на всех его обмотках меняет свой знак. Когда напряжение на обмотке рекуперации станет равным напряжению на фильтровой емкости управляемого выпрямителя, начнется передача ре-

активной энергии трансформатора обратно в источник питания. В течение всего процесса передачи энергии, напряжение во всех обмотках поддерживается постоянным, таким образом, формируется обратная волна напряжения. Соотношение амплитуд прямой и обратной волны определяется числами витков первичной обмотки и обмотки рекуперации. Они выбраны так, что обратная волна существенно меньше прямой, что облегчает режим работы рентгеновской трубки.

- Датчик температуры расположен вблизи от анода в потоке масла, отводимом от анода трубки. Схема термозащиты настроена таким образом, что, если температура масла превысит 60 °С, подача высоковольтных импульсов на трубку прекращается. Возможность повторного включения аппарата восстанавливается после того, как температура снизится до 40 °С.

Блок питания

Упрощенная структурная схема блока питания представлена на рис. 2.7.3.

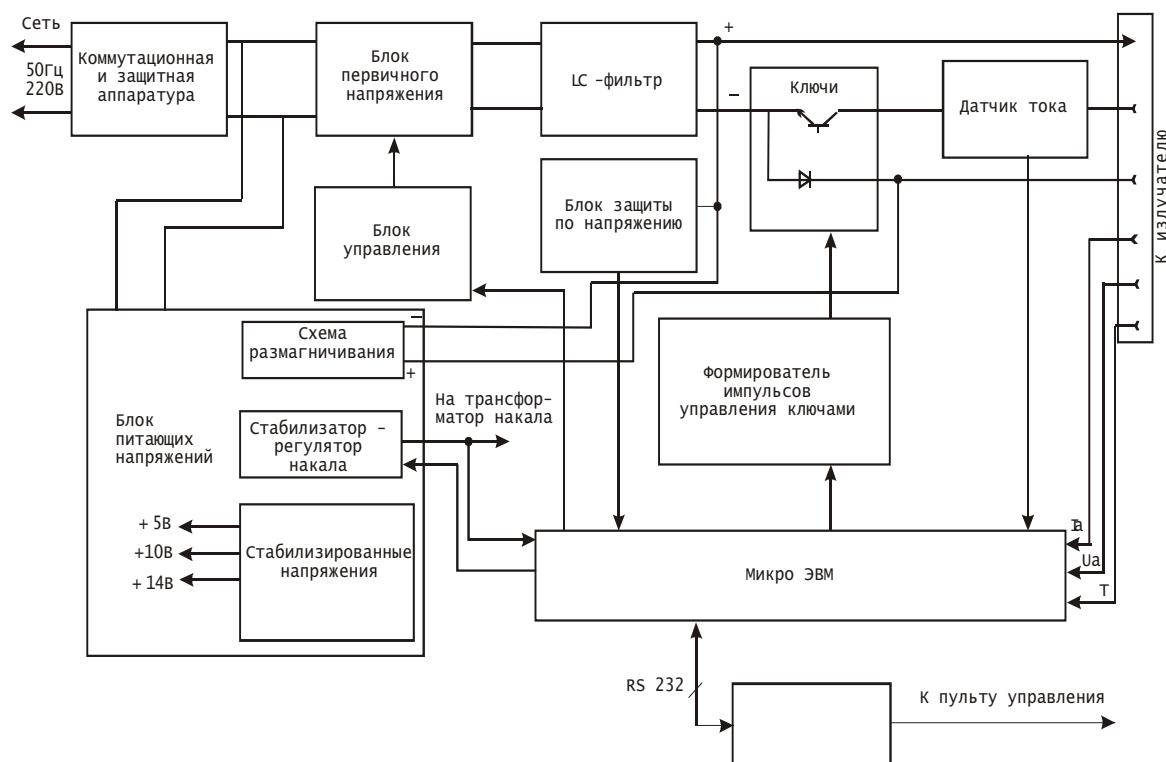


Рис. 2.7.3. Структурная схема блока питания

Условно элементы блока питания можно разделить на две группы: силовую часть, формирующую высоковольтные импульсы и обеспечивающую преобразование относительно большой электрической мощности, и управляющую часть, определяющую в итоге характер преобразования этой мощности.

В силовую часть входят: блок первичного напряжения, LC-фильтр, транзисторный и тиристорный ключи, которые коммутируют выходное напряжение фильтра на первичную обмотку импульсного трансформатора, а также коммутационная и защитная аппаратура.

Большой LC-фильтр обеспечивает коэффициент пульсации выходного постоянного напряжения менее 1 %, что в сочетании со стабилизацией напряжения дает высокую стабильность энергетического спектра рентгеновского излучения. Регулируемое напряжение на LC-фильтре обеспечивает блок первичного напряжения.

Все управляющие функции обеспечивает встроенная в блок питания микроЭВМ, выполненная на базе процессора фирмы Motorola 68HC908MR32, имеющего многоканальный АЦП.

Входными сигналами микроЭВМ являются напряжение накала, подаваемое на трансформатор накала, напряжение с термодатчика излучателя, а также импульсные сигналы, пропорциональные высокому напряжению на трубке U_a и ее анодному току I_a и току через транзисторный ключ.

МикроЭВМ выполняет следующие основные функции:

- реализует выбранный режим работы;
- обеспечивает плавный подъем высокого напряжения до установленного уровня;
- дает возможность регулировать и стабилизировать высокое напряжение и анодный ток в широких пределах;
- подает управляющие импульсы требуемой длительности, фазы и частоты на формирователи запуска силовых элементов;
- прекращает работу блока первичного напряжения и ключей, если импульсный ток трубки, высокое напряжение и ток силового транзистора превысят максимально-допустимые значения;
- прекращает работу силовой части, если напряжение накала выйдет за заданные пределы или напряжение на фильтровой емкости превысит 250 В.
- отключает силовую часть, если температура масла в излучателе станет больше +60 °С и дает разрешение на включение, когда она снизится до +40 °С;

Блок питания содержит бестрансформаторный блок питающих напряжений, обеспечивающий питание стабилизатора + 5 В, стабилизатора – регулятора напряжения накала трубки, а также напряжения для схемы размагничивания импульсного трансформатора и формирователей импульсов.

В нижней части расположен сетевой тумблер с подсветкой, который включает питание как силовой части, так и системы управления. Над ним расположен светодиод, свечение которого указывает на наличие напряжения +5 В. Еще выше расположен красный светодиод, который загорается при включении излучения.

В правом нижнем углу расположен замок, который блокирует несанкционированное включение излучения. Если замок не включен, на дисплее пульта управления будет сообщение:

«Key off», «Ключ» (ключ разомкнут).

Для того чтобы начать работу с излучением, необходимо вставить ключ и повернуть его вправо.

Выше замка расположен переключатель режимов работы аппарата. В нижнем положении переключателя имеет место автономный режим, когда излучение включается оператором с помощью кнопки «Пуск» на пульте управления. При внешнем управлении (верхнее положение тумблера), излучение появится только с поступлением сигнала внешнего запуска и исчезнет с его прекращением, либо после нажатия кнопки «Стоп». Переключение режимов работы производится только при включенном излучении.

Над переключателем режимов работы аппарата под шлиц выведен переменный многооборотный резистор, регулирующий ручную диапазон изменения напряжения накала.

На задней панели находятся разъемы, предохранители, клеммы дверной блокировки и заземления.

В правой части задней панели установлены защитные элементы. Два предохранителя в малых корпусах защищают цепи питания системы управления. Два предохранителя в больших корпусах на 10 А установлены в сетевые провода, идущие на управляемый выпрямитель. В правой нижней части задней панели расположены два цилиндрических разъема. Левый разъем служит для сетевого шнура, далее следует разъем подключения излучателя.

В левой нижней части задней панели расположены два разъема типа «сапон» для подключения пульта и аппаратуры дистанционного управления.

Для включения излучения внешней аппаратурой необходимо провод внешнего запуска (контакт 1 разъема внешнего запуска) замкнуть на общий провод (контакт 6), при этом коммутируемый ток не превышает 1 мА. После выхода аппарата на установленные параметры на контакте 2 этого же разъема высокий (ТТЛ) уровень напряжения сменится на низкий (активный логический уровень – 0). Сопротивление нагрузки, подключаемой к контакту 2, должно быть не менее 10 кОм. Для удобства

подвода и съема сигналов витыми парами контакт 7 разъема внешнего управления также соединен с общим проводом блока питания. Назначение контактов разъема внешнего запуска приведено в табл. 2.7.3.

Таблица 2.7.3
Разъем внешнего запуска

Контакт	Цепь
1	Внешний запуск
2	Выход на режим
3	
4	
5	Сигнализация
6	Общий
7	Общий
8	
9	Сигнализация

Через разъем «Дист. упр.» можно подключать устройства внешней сигнализации наличия излучения. Для этой цели на контакты 5 и 9 разъема «Дист. упр.» подведены контакты внутреннего реле, которые замыкаются при включении излучения. Через контакты этого реле может быть включено внешнее реле пользователя. Реле имеет напряжение питания обмотки не более 36 В и ток срабатывания до 100 мА.

Внизу, по центру, между разъемами излучателя и пульта расположены предохранитель вентиляторного блока, клемма заземления и две клеммы дверной блокировки («БЛОКИР»).

Аппарат снабжается сетевой вилкой европейского стандарта с заземлением. Если используется трехпроводная сеть, заземление при помощи отдельного провода необязательно. Если же аппарат включается в двухпроводную сеть, работать без заземления запрещается.

Для обеспечения нормальной работы аппарата необходимо, чтобы клемма дверной блокировки была замкнута на клемму заземления. Коммутируемый ток при этом не превышает 20 мА. При разрыве этой цепи (например, дверной блокировкой) в управляющую микроЭВМ поступает сигнал блокировки. МикроЭВМ, в свою очередь, прекращает формирование управляющих импульсов и выдает сообщение: «Door», «Дверь» (дверь разомкнута), которое не будет снято, пока контакт в цепи блокировки не восстановится.

Как передняя, так и задняя панель блока питания одновременно выполняют функции радиатора. Основные тепловыделяющие элементы блока установлены с внутренней стороны этих панелей.

Пульт управления

Для обеспечения безопасности работы оператора в полевых условиях аппарат снабжен легким пультом управления и кабелем длиной 20 м.

Аппарат может работать без вентиляторного блока, но при этом значительно возрастают перерывы между рабочими циклами.

2.7.6. Порядок установки

1. Извлеките из транспортной тары блоки и кабели аппарата, протрите их и проверьте, нет ли вмятин на корпусах, следов удара и других механических повреждений. Внимательно посмотрите, нет ли подтеков масла в излучателе. Встряхните блоки и проверьте, не отвалились ли внутри элементы.

2. Установите составные части аппарата в предназначенные для них места в блоках. Заземлите аппарат (если это необходимо), присоединив отдельный заземляющий провод к клемме на задней панели пульта управления. Соедините блоки кабелями в соответствии с рис. 2.7.1.

2.7.7. Подготовка аппарата к работе

1. Произведите подготовку аппарата к работе в следующем порядке:

- проверьте, выключен ли сетевой тумблер на передней панели блока питания или установите его в выключенное состояние;
- включите сетевой шнур питания в розетку, к которой подведено сетевое напряжение. Желательно, чтобы розетка подключалась к сети через автомат защиты с током (16...25) А;

2. Первое включение аппарата необходимо осуществить в следующем порядке:

- включите тумблер «Сеть» блока питания, при этом должен засветиться зеленый светодиод над ним, а на дисплее пульта управления должен появиться предыдущий режим работы аппарата и температура излучателя. Иногда при включении тумблера «Сеть» появляется звук зуммера и сообщение «LOW F». Это связано с длительным протеканием переходных процессов в цепи накала трубки. Звук и сообщение снимаются при нажатии кнопки «Стоп»;

- обязательно проверьте наличие свечения катода трубки через выходное окно и работу маслососа по характерному шуму, который прослушивается у излучателя; вентиляторный блок должен быть при этом отключен;

- при наличии вентиляторного блока убедитесь, что он работает нормально;

- включите режим внутреннего управления;

- установите следующие параметры: $U = 60$ кВ, $I = 1$ мА, $T = 30$ с и нажмите кнопку включения излучения.

Через 2–3 секунды аппарат должен выйти на установленный режим и, проработав 30 с, отключиться. При этом зуммер должен издавать прерывистый звук, который прекращается после нажатия кнопки «Стоп».

2.7.8. Порядок и правила работы

1. В соответствии с методическими указаниями на проведение рентгеновского контроля или других работ с излучением данного аппарата, определите требуемое высокое напряжение, анодный ток и время экспозиции. При выборе режима работы аппарата следует учитывать ограничения, приведенные в п. 3.4 и п. 3.12 данного описания.

Не стремитесь работать на предельных режимах аппарата, особенно в области напряжений 150...160 кВ. Для каждого конкретного случая выбирайте минимальное возможное высокое напряжение. Это позволит увеличить срок службы аппарата.

На рис. 4 приведены номограммы для просвечивания стали. Номограммы построены для следующих условий просвечивания: пленка – D7 (R7), со свинцовыми экранами толщиной 27 мкм, фокусное расстояние – 70 см, проявка – ручная, в стандартных условиях. Оптическая плотность почернения $D_{opt} = 2,0$.

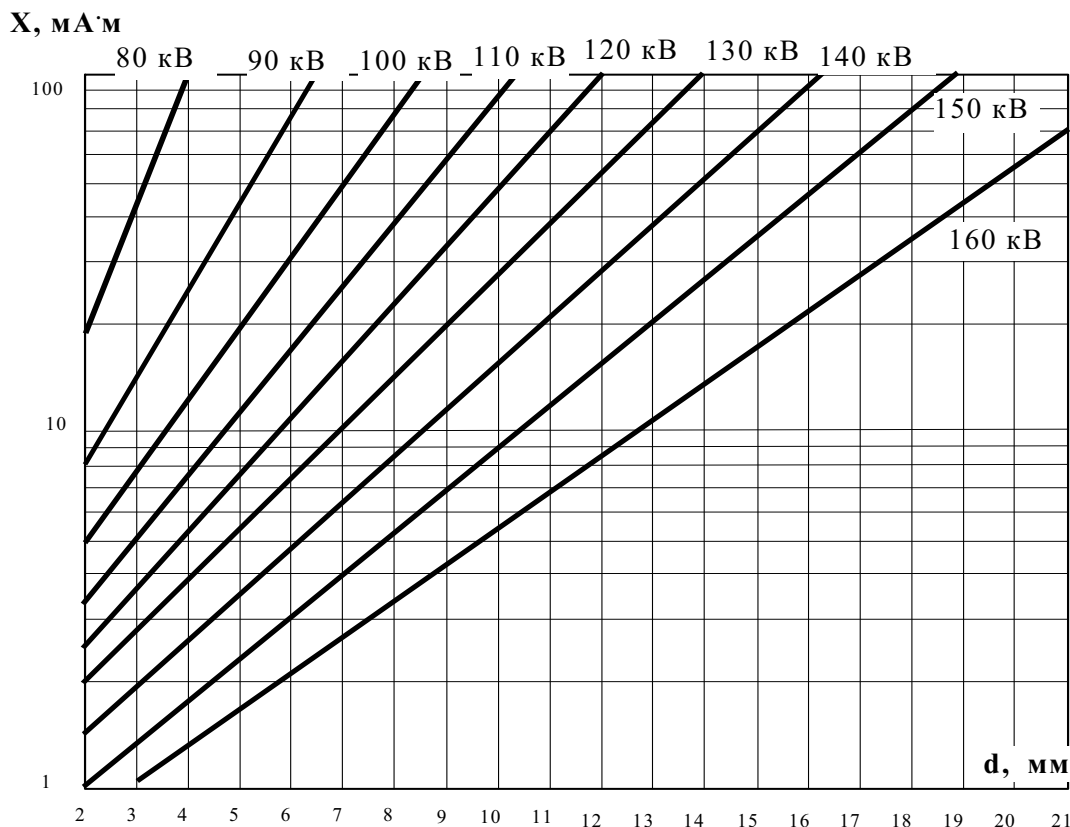


Рис. 2.7.4. Номограммы для просвечивания стали

На рис. 2.7.5 показаны графики относительной контрастной чувствительности для стали.

2. Подайте на аппарат питание от сети и включите тумблер «Сеть» на блоке питания.

3. Выберите необходимый режим работы тумблером «Вн. зап». на передней панели блока питания. Установите на пульте управления требуемые параметры экспозиции аппарата. Дальнейшая работа зависит от выбранного режима.

Режим внутреннего управления

Нажмите кнопку «Пуск». Сразу после нажатия кнопки начинается плавный подъем высокого напряжения. Для прекращения экспозиции нажмите кнопку «Стоп». Если излучение выключилось автоматически после истечения заданного времени, звук зуммера убирается также нажатием кнопки «Стоп».

Режим внешнего управления

Переведите тумблер «Вн. управл.» в верхнее положение. Высокое напряжение появляется после того, как поступит сигнал внешнего запуска (когда контакт 1 разъема внешнего управления будет замкнут на общий провод, ток через контакты не более 1 мА).

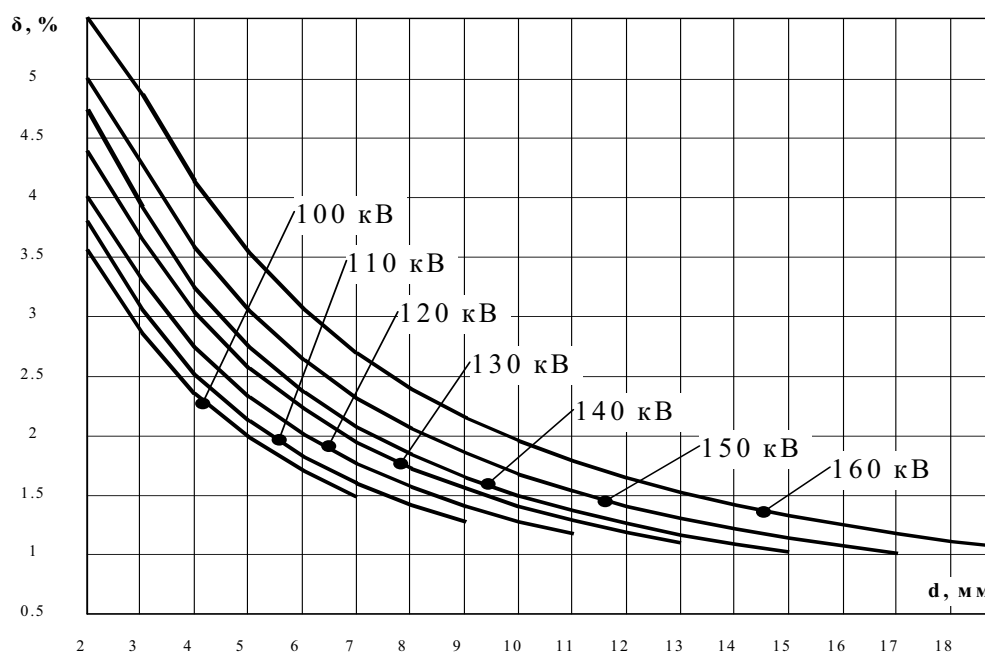


Рис. 2.7.5. Относительная контрастная чувствительность для стали

Выключение излучения при внешнем запуске происходит либо при снятии сигнала внешнего управления (при размыкании контакта 1 и общего провода), либо при окончании времени экспозиции, либо при нажатии кнопки «Стоп» на пульте управления. При отключении излучения внешней аппаратурой время экспозиции останавливается, но зуммер не возбуждается. После прекращения экспозиции или экспозиций нажмите кнопку «Стоп».

4. Наличие микропроцессорного управления требует соблюдения несложных правил включения и выключения аппарата.

Полное отключение аппарата рекомендуется производить следующим образом: между выключением высокого напряжения кнопкой «Стоп» пульта управления и сетевого питания тумблером «Сеть» блока питания должна быть пауза не менее 50–60 с. Это связано с тем, что после выключения питания на конденсаторах фильтра достаточно долго удерживается напряжение. В то же время, при выключении питания могут иметь место сбои в работе программы, сопровождающиеся выдачей «нестандартных» управляющих импульсов. При неблагоприятных сочетаниях эти процессы могут вызвать выход из строя силового транзистора.

2.7.9. Указание мер безопасности

Общие указания

Основными видами опасности для персонала при радиографическом контроле является воздействие на организм ионизирующего излучения и вредных газов, образующихся в воздухе под воздействием излучения, а также поражение электрическим током.

При работе с аппаратом необходимо обеспечить безопасность работ в соответствии с требованиями «Санитарных правил при проведении рентгеновской дефектоскопии» № 2191-80, «Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности при работе с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» – ОСПОРБ-99.

При эксплуатации подключенного рентгеновского аппарата необходимо обеспечивать безопасность работ в соответствии с требованиями «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

2.7.10. Техническое обслуживание

1. Рентгеновский аппарат РАП160-5, как и любое сложное электро-техническое устройство, нуждается в техническом обслуживании.

2. Постоянно обращайтесь внимание на наличие подтеков масла в излучателе. При наличии подтеков, проверьте состояние мест соединений и при необходимости подтяните их.

3. Периодически проверяйте крепление кабелей в разъемах. Если крепление ослаблено и кабели проворачиваются относительно корпуса разъема, закрепите кабели. Смазывайте любой консистентной смазкой в небольших количествах резьбовые части разъемов.

4. Периодически, не реже одного раза в два месяца, сняв верхнюю крышку, продуйте внутренний объем блока питания пылесосом или сухим воздухом, очищая его от пыли.

5. Питание лазерного указателя центра пучка осуществляется от трех элементов типа AG13. В случае значительного уменьшения интенсивности светового потока лазерного указателя или полного прекращения его работы, необходимо заменить питающие элементы.

2.7.11. Правила транспортирования и хранения

1. Аппарат может транспортироваться в закрытых железнодорожных вагонах, контейнерах, автомашинах, в трюмах судов, отапливаемых и герметизированных отсеках самолетов в соответствии с действующими на этих видах транспорта правилами перевозки грузов и при соблюдении следующих условий:

- температура окружающей среды от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность не более 90 % при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при более низких температурах без конденсации влаги.

2. Аппарат при перерывах в работе должен находиться в сухом закрытом помещении в следующих условиях:

- температура воздуха от $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность 90 % при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.7.12. Контрольные вопросы

1. Основные назначения рентгеновского аппарата.
2. Объяснить принцип работы аппарата.
3. Объяснить принцип работы схемы блока питания.

ГЛАВА 3. ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

3.1. Измерение рабочей характеристики счетчика Гейгера–Мюллера

3.1.1. Цель работы

Изучение принципа действия и основных характеристик счетчиков Гейгера–Мюллера и измерение рабочей характеристики.

3.1.2. Приборы и оборудование

Установка типа Б с высоковольтным блоком питания (типа БВ-2-2), свинцовый домик, набор газонаполненных счетчиков разных марок (МС, ГС, ВС, СТС, СБТ и т. д.), источник излучения, секундомер.

3.1.3. Общие сведения

Счетчик ионизирующего излучения можно представить себе как газоразрядный промежуток с сильно неоднородным электрическим полем. Чаще всего применяются счетчики с коаксиально расположенными цилиндрическими электродами: внешний цилиндр – катод и тонкая нить, натянутая на его оси – анод. Внутренний, или собирающий, электрод (анод) представляет собой тонкую прямую проволоку диаметром $\sim 0,1$ мм, оба конца которой укреплены на изоляторах. Этот электрод обычно изготавливают из вольфрама, позволяющего получить прочную и однородную проволоку малого диаметра. Другой электрод (катод) составляет обычно часть оболочки счетной трубки. Если стенки трубки стеклянные, то ее внутреннюю поверхность покрывают проводящим слоем (медь, вольфрам, сталь, нихром и т. д.).

Электроды располагаются в герметически замкнутом резервуаре, наполненном каким-либо газом (гелий, аргон и др.) до давления от нескольких сантиметров до десятков сантиметров ртутного столба. Газы, используемые для наполнения счетчиков, должны обладать достаточно малым коэффициентом прилипания электронов, т. е. чтобы перенос отрицательных зарядов в счетчике осуществлялся свободными электронами. Для регистрации частиц, обладающих малым пробегом (α -частицы, электроны), в резервуаре счетчика делается окно, через которое частицы попадают в рабочий объем.

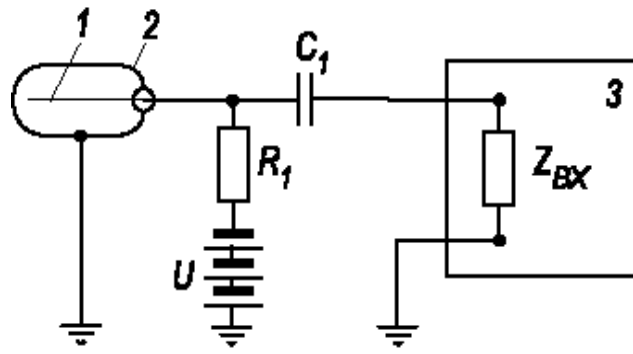


Рис. 3.1.1. Схема включения импульсного газонаполненного детектора:
1 – анод; 2 – катод; 3 – регистрирующее устройство

Схема включения показана на рис. 3.1.1. Напряжение между собирающим электродом и катодом счетчика подается от высоковольтного источника питания. Приведенная схема имеет то преимущество, что катод счетчика поддерживается под потенциалом земли. Собирающий электрод имеет высокий положительный потенциал относительно земли. Конденсатор $C1$ разделяет высоковольтную цепь питания счетчика и входную цепь электронной схемы. Сопротивление $R1$, включенное последовательно с источником питания, отделяет собирающий электрод от источника питания. Благодаря этому сопротивлению потенциал нити во время разряда снижается. Величина сопротивления ($R1 \sim 10^8 \dots 10^9$ Ом) подбирается таким образом, чтобы можно было поддерживать пониженное напряжение на аноде до тех пор, пока положительные ионы не дойдут до катода и нейтрализуются на нем.

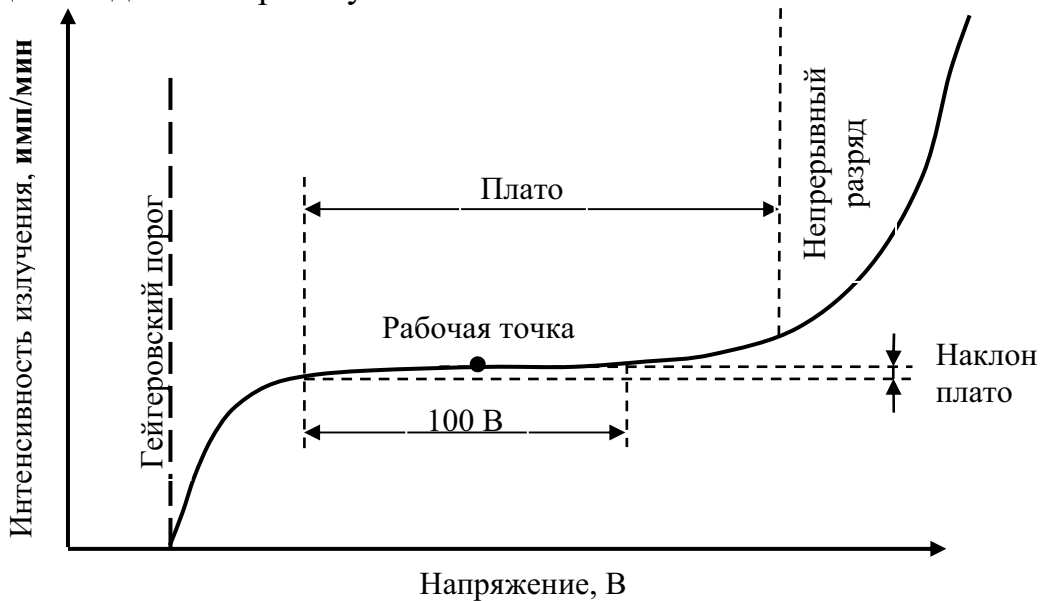


Рис. 3.1.2. Рабочая характеристика газонаполненного счетчика гамма-квантов

Основной характеристикой газонаполненных счетчиков, работающих в режиме Гейгера–Мюллера, является кривая зависимости числа регистрируемых импульсов в единицу времени от поданного на него высокого напряжения при постоянной интенсивности облучения счетчика. Типичная характеристика газонаполненного счетчика гамма-квантов типа МС-4 приведена на рис. 3.1.2.

По оси абсцисс отложено напряжение на счетчике, по оси ординат – соответствующее число импульсов в минуту при постоянной интенсивности регистрируемого излучения. Характеристика снимается при регистрации либо фона, либо излучения радиоактивного препарата, при этом геометрические условия измерения (расстояние счетчик – препарат) не должны изменяться. При снятии характеристики необходимо периодически повышать рабочее напряжение на 10...50 В и каждый раз производить замеры, набирая по 500 импульсов за одно измерение. В приведенной на рис. 3.1.2 характеристике начало счета (гейгеровский порог) соответствует напряжению 750 В, число импульсов в минуту быстро возрастает до 100 при напряжении 800 В, называемом минимальным рабочим напряжением, или началом «плато», в пределах которого скорость счета увеличивается незначительно с ростом напряжения. Максимальное рабочее напряжение, или конец плато, равно 1000 В. Таким образом, протяженность плато составляет 200 В. Выше максимального рабочего напряжения начинаются длительные разряды в счетчике – скорость счета резко возрастает.

В пределах первой трети плато выбирается рабочая точка, которая, как правило, превышает гейгеровский порог примерно на 100 В. Отношение разностей $(\Delta N/N) / \Delta U$, где N – исходная скорость счета, $N + \Delta N$ – скорость счета при увеличении напряжения на 100 В, в области плато называется наклоном счетной характеристики. Наклон плато выражается в процентах на 100 В. Для характеристики, изображенной на рис. 3.1.2, наклон плато равен 5 % на 100 В. Длина и наклон плато являются критериями, по которым судят о качестве счетчиков гамма-квантов.

Галогенные цилиндрические счетчики (типа СТС) являются низковольтными – рабочее напряжение 360...440 В, у счетчиков типа МС, ГС и ВС рабочее напряжение порядка 800...1500 В. Наклон плато зависит от числа ложных разрядов, а также от влияния краевых эффектов. Ложные импульсы вызываются загрязнением материалов счетчика, неоднородностью поверхности катода и нити счетчика, низким давлением гасящего газа и т. д. Параметры счетчика, определяемые длиной плато и его наклоном, в процессе работы ухудшаются. Самогасящиеся счетчики с аргоном – метиловым и этиленовым наполнителями имеют ограниченный срок службы. Это объясняется тем, что при каждом импульсе некоторое количество молекул гасящего газа распадается на составные части (диссоции-

рует), причем продукт диссоциации (углерод) может отлагаться на катоде или аноде. В этом случае количество ложных импульсов возрастает, наклон плато увеличивается, а длина плато уменьшается. При изменениях, превышающих определенные пределы, характерные для каждого счетчика, заканчивается срок службы счетчика. На практике за окончание срока службы принимают момент, когда длина плато резко сокращается, а его наклон становится более 15 % на 100 В. Средний срок службы самогасящихся счетчиков типа МС, ВС, ГС составляет 10^8 – 10^9 импульсов.

Счетчики с галогенным наполнением (типа СТС) имеют более короткое плато (~ 80 В), но гарантированный ресурс их работы продолжительнее. На длину и наклон плато влияют также изменения температуры, а потому для каждого типа счетчиков указывается диапазон температур, обеспечивающий нормальный режим их работы.

Наличие более или менее протяженного плато в газонаполненных счетчиках исключает необходимость высокой стабилизации питающего напряжения. Для точных измерений достаточна стабильность высокого напряжения ± 1 %.

3.1.4. Порядок выполнения работы

1. Установку подготовить к работе.
2. В блок детектора (свинцовый домик) установить газонаполненный счетчик типа МС, ВС, СТС или др., и произвольный источник гамма-излучения с активностью 100–500 имп/мин (в области плато).
3. Изменяя питающее напряжение на 50 В, регистрировать на каждом напряжении по 500 импульсов.
4. Построить кривую зависимости числа регистрируемых импульсов (имп/мин) от напряжения. Определить плато и выбрать рабочую точку.

3.1.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Перечень приборов и оборудования.
3. Основные теоретические сведения.
4. Порядок выполнения работы.
5. График рабочей характеристики счетчиков Гейгера–Мюллера.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

3.1.6. Контрольные вопросы

1. Описать принцип действия счетчика Гейгера–Мюллера.
2. Как снять характеристику газонаполненного счетчика гамма-квантов?

3. Что называется наклоном счетной характеристики?
4. По каким критериям судят о качестве счетчиков?
5. От чего зависит наклон плато?

Список использованной литературы

1. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / под ред. С.В. Румянцева. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
2. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с., ил.
3. Тишкин П.А. Экспериментальные методы ядерной физики. Ч. 1. – Л.: ЛГУ, 1970. – 232 с.
4. Иванов В.И. Курс дозиметрии: учебник для вузов. – 2-е изд-е. – М.: Атомиздат, 1970. – 392 с.
5. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. – М.: Наука, 1966. – 408 с.
6. Эстулин И.В. Практикум по ядерной физике. Вып. 1. Радиоактивные излучения. – М.: Физматгиз, 1962. – 260 с., ил.
7. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1. В 2 кн. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль; кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с., ил.

3.2. Измерение характеристики сцинтилляционного гамма-счетчика

3.2.1. Цель работы

Изучение принципа действия сцинтилляционного детектора гамма-излучения и измерение его характеристик.

3.2.2. Общие сведения

Сцинтилляционный счетчик состоит из сцинтиллятора и фотоэлектрического умножителя (ФЭУ). Возникающие в сцинтилляторе при попадании на него гамма-квантов световые вспышки с помощью ФЭУ преобразуются в импульсы тока, подаваемые далее в измерительный блок.

ФЭУ представляет собой комбинацию фотоэлемента и электронного умножителя, в котором число электронов, выбиваемых из фотокатода, в результате вторичной эмиссии из динодов увеличивается в 10^6 – 10^8 раз. Вторичная эмиссия электронов из динодов возникает за счет сущест-

вующей между ними разности потенциалов, причем каждый последующий диод имеет положительное по отношению к предыдущему напряжение.

Возникающий на первом диоде электрон образует на втором несколько вторичных электронов, каждый из которых на последующем диоде выбивает новые вторичные электроны. В результате многократного умножения электронного тока с помощью вторичной эмиссии получается усиление, равное при n каскадах:

$$K = \sigma^n, \quad (1)$$

где σ – коэффициент вторичной электронной эмиссии; n – число диодов.

Интегральная чувствительность ФЭУ, $\gamma_{\text{ф}}$, измеряемая в амперах на люмен, может меняться при изменении напряжений между отдельными диодами. Верхний предел изменения чувствительности ограничен наличием «темнового» тока, связанного с появлением тепловых электронов.

Темновой ток ФЭУ, обусловленный в основном термоэлектронной эмиссией с фотокатода, возрастает с повышением температуры окружающей среды и может быть существенно уменьшен путем охлаждения фотокатода и первых диодов умножителя.

Наложение импульсов, обусловленных темновым током (импульсы фона), на импульсы тока, вызываемые регистрируемым излучением, снижает статистическую точность измерений. Поэтому в схемах сцинтилляционных радиометров предусматриваются устройства, позволяющие разделять импульсы, обусловленные взаимодействием регистрируемого излучения с веществом кристаллофосфора, и импульсы фона.

При достаточных интенсивности и амплитуде сцинтилляционных импульсов наиболее простым способом разделения следует считать амплитудную дискриминацию импульсов. На практике некоторое снижение влияния фона достигается рациональным выбором рабочего напряжения ФЭУ, при котором обеспечивается оптимальное соотношение между величиной полезного сигнала и шумом (импульсами фона).

Для ФЭУ наблюдается очень резкая зависимость чувствительности от питающего их высокого напряжения. Кривая зависимости чувствительности и коэффициента усиления ФЭУ от напряжения питания приведена на рис. 3.2.1. При этом следует иметь в виду, что колебания питающего напряжения очень сильно сказывается на чувствительности ФЭУ и это влияние тем больше, чем меньше напряжение на каждом отдельном диоде.



Рис. 3.2.1. Зависимость коэффициента усиления фотоэлектронного умножителя от питающего напряжения

В процессе работы фотоэлектронного умножителя могут изменяться его параметры и рабочая характеристика в связи с его старением (необратимые изменения) и «утомляемостью» (обратимые изменения). Утомляемость ФЭУ проявляется обычно в первые минуты работы, в связи с чем для установления нормального режима работы его необходимо включать в схему за 20–30 мин до измерения при максимальной предполагаемой нагрузке.

Рабочее напряжение U при работе со сцинтилляционным гамма-счетчиком выбирается, исходя из зависимости:

$$U = f\left(\frac{N_{\text{обр+фон}} - N_{\text{фон}}}{N_{\text{фон}}}\right), \quad (2)$$

где $N_{\text{обр+фон}}$ – скорость счета, получаемая от образца (с добавкой скорости счета фона); $N_{\text{фон}}$ – скорость счета фона.

Напряжение, при котором получается максимальное значение указанного отношения, и характеризует величину рабочего напряжения.

Образец (гамма-излучающую пробу) целесообразно выбирать таким образом, чтобы скорость счета от него была значительно больше скорости счета фона.

Поглощение энергии веществом и её последующее испускание в виде видимого или близкого к видимому излучения известно как люминесценция. Причинами, вызывающими люминесценцию, могут быть свет, нагревание, механические напряжения, химические реакции и воз-

действия заряженных частиц на вещество-люминофор. Вспышки света, вызванные заряженными частицами и гамма-квантами, обычно называют сцинтилляциями. Вещество сцинтиллятора может быть твердым, жидким и газообразным. Рассмотрим сцинтилляционный процесс в твердотельном неорганическом кристаллическом сцинтилляторе.

Под действием быстрой заряженной частицы электроны кристалла переходят из заполненной зоны в зону проводимости или на промежуточные уровни, если они существуют в данном кристалле. Возвращение электронов в основное состояние сопровождается испусканием фотонов, длина волны которых обычно лежит в интервале $(1000...7000) \text{ \AA}$, а полуширина спектральной характеристики составляет 1000 \AA . На рис. 3.2.2 показана спектральная характеристика кристалла NaJ(Tl) – одного из наиболее употребляемых сцинтилляторов. Спектр излучения кристалла должен перекрываться со спектральной характеристикой чувствительности применяемого ФЭУ.

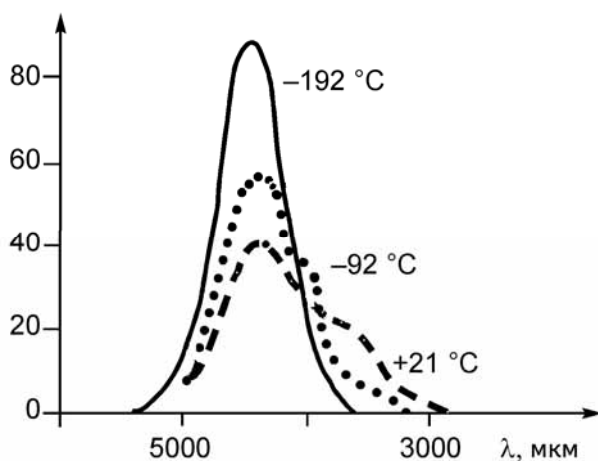


Рис. 3.2.2. Спектральная характеристика кристалла NaJ(Tl) при различных температурах

В качестве кристаллов берут такие кристаллы, для которых полоса поглощения собственного излучения лежит за пределами частот люминесцентного излучения. Обычно средняя частота основной полосы поглощения больше частоты, соответствующей средней длине волны люминесценции. В этом случае кристаллы будут прозрачны для собственного излучения. Например, сцинтилляция в кристалле NaJ(Tl) имеет длину волны 4100 \AA , а спектр поглощения лежит в ультрафиолетовой области и имеет максимумы при 2930 \AA и 2340 \AA . Поэтому прозрачность кристалла NaJ(Tl) для собственного излучения близка к 100 %.

Часто в кристалл-сцинтиллятор вносят атомы примесных веществ – активаторов. Примерами таких сцинтилляторов могут служить йодистый натрий, активированный таллием – NaJ(Tl) ; сернистый цинк, акти-

вированный серебром – ZnS(Ag) и др. Обычно применяют вещества-активаторы с большим z .

Введение активатора (как правило, вещества с высоким z) повышает световыход кристалла. Световыход – это отношение числа фотонов в одной сцинтилляции к энергии, потерянной заряженной частицей или гамма-квантом в сцинтилляторе.

Кристаллы, употребляемые в качестве сцинтилляторов, должны быть флюоресцирующими, т. е. высвечивание возбужденных состояний в них должно происходить сразу после возбуждения. Обычно кристаллы-сцинтилляторы имеют время высвечивания $\tau = 10^{-7} \dots 10^{-9}$ с.

Существуют два больших класса кристаллических сцинтилляторов – неорганические и органические. Неорганические кристаллы представляют собой соли различных металлов, чаще всего щелочных. Широкое применение получили кристаллы щелочных металлов, активированные таллием – NaJ(Tl), CsJ(Tl). Эти кристаллы обладают высокой плотностью и большим эффективным порядковым номером $z_{\text{эфф}}$, поэтому они часто применяются для регистрации и спектрометрии гамма-излучения. Отметим, что гамма-кванты непосредственно не производят ионизации, однако в процессе их взаимодействия с веществом сцинтиллятора в нем появляются электроны в результате фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар. Сечения этих процессов увеличиваются при больших значениях z , поэтому эффективность регистрации гамма-лучей в активированных неорганических кристаллах относительно велика. Например, эффективность регистрации гамма-лучей с энергий 1 МэВ кристаллом NaJ(Tl) составляет ≈ 20 %.

Альфа-частицы и другие тяжелые заряженные частицы обычно регистрируются тонкими слоями микрокристаллов ZnS(Ag); ZnS(Cu); ZnO.

Общим недостатком неорганических кристаллов является их относительно большое время высвечивания $\tau \approx 10^{-7}$ с и более.

Для регистрации электронов неорганические кристаллы обычно не используются, так как электроны испытывают сильное рассеяние на поверхности кристалла и не проникают внутрь него. Электроны, как правило, регистрируются органическими кристаллами, представляющими собой ароматические углеводороды, в состав которых входят бензольные кольца. Примерами органических кристаллов могут служить кристаллы стильбена и антрацена. Преимуществами органических кристаллов являются их малое время высвечивания ($\tau \approx 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) и высокая эффективность регистрации электронов.

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) служат для преобразования световых вспышек сцинтиллятора в импульсы электрического тока. Основными элементами ФЭУ являются фотокатод, система ускоряющих электродов и анод, собирающий электроны (рис. 3.2.3).

Сцинтиллятор с помощью специальных масел или клея, обеспечивающих оптический контакт, прикрепляется к торцу стеклянного баллона ФЭУ. Изнутри на этот торец наносится полупрозрачный металлический слой, представляющий собой фотокатод. Свет сцинтиллятора вырывает из фотокатода электроны, которые фокусируются на первый динод ФЭУ. Наибольшее распространение получили сурьмяно-цезиевые (Sb-Cs) фотокатоды.

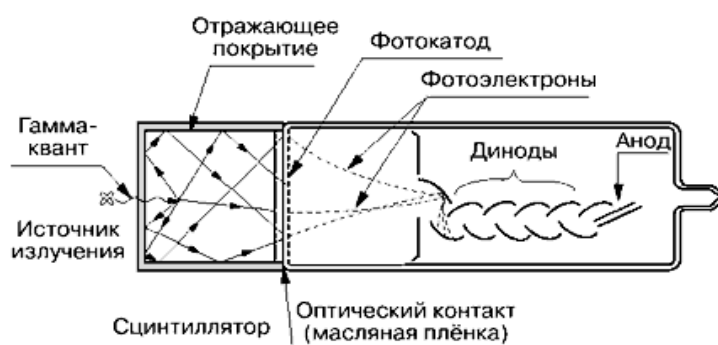


Рис. 3.2.3. Устройство ФЭУ

Основными характеристиками ФЭУ являются:

- квантовый выход ε , который определяется как число фотоэлектронов, выбитых одним световым квантом (у лучших ФЭУ $\varepsilon \approx 0,2$);
- интегральная чувствительность – отношение фототока к падающему на фотокатод световому потоку белого света (для лучших ФЭУ интегральная чувствительность составляет ≈ 100 мкА/лм);
- спектральная характеристика, которая должна перекрываться со спектральной характеристикой сцинтиллятора. Обычно максимум спектральной чувствительности ФЭУ лежит в области $\lambda \approx 400$ нм;
- плотность тока тепловой эмиссии (электроны тепловой эмиссии создают фон, затрудняющий измерения);
- равномерность покрытия фотокатода, влияющая на амплитудное разрешение ФЭУ.

Попавшие на первый динод электроны выбивают из него вторичные электроны, которые фокусируются на следующий динод. Материал динодов выбирается таким, чтобы коэффициент вторичной эмиссии был больше единицы. В этом случае происходит умножение числа электронов. Полный коэффициент усиления ФЭУ равен:

$$M = \theta \cdot (\delta)^n, \quad (3)$$

где θ – коэффициент, характеризующий сбор вторичных электронов с динодов; n – число умножающих динодов; δ – коэффициент усиления динода.

Коэффициент усиления ФЭУ сильно зависит от величины ускоряющего напряжения на динодах. Эта зависимость выражается формулой:

$$M = M_0 e^{U/U_0}, \quad (4)$$

где M_0 и U_0 – некоторые постоянные величины для данного ФЭУ. Для поддержания постоянства величины M в пределах 1 % требуется стабильность напряжения U , подаваемого на ФЭУ, в пределах (0,01–0,1) %.

Схема подачи высокого напряжения на диноды ФЭУ показана на рис. 2.3.4. Обычно $U \approx (500 \dots 1500)$ В, междудинодные напряжения порядка (75...100) В.

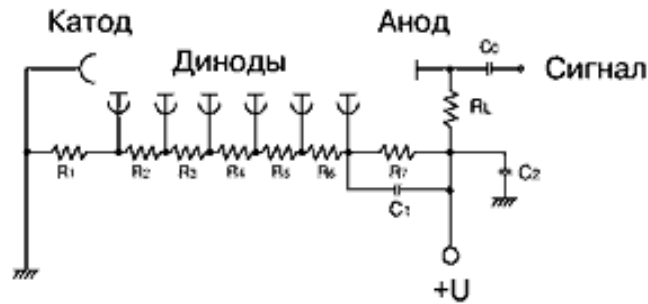


Рис. 2.3.4. Схема подачи напряжения на диноды ФЭУ

По своему применению ФЭУ делятся на спектрометрические и временные. Основным требованием, предъявляемым к спектрометрическим ФЭУ, является хорошая собственная амплитудная разрешающая способность. Обычно она составляет (3–5) %. Лучшие временные ФЭУ характеризуются временем нарастания импульса тока порядка 0,1 нс. Важной характеристикой ФЭУ является диаметр фотокатода. В зависимости от назначения, применяют ФЭУ с диаметром фотокатода от 15 до 300 мм.

3.2.3. Порядок выполнения работы

Измерить счетную характеристику сцинтилляционного гамма-счетчика и выбрать рабочее напряжение. В качестве сцинтилляционного гамма-счетчика выбран стандартный спектрометрический сцинтилляционный детектор типа БДИС 3-05, представленный на рис. 2.3.5.

При снятии характеристики напряжение на счетчике увеличивать каждый раз на 50 В, причем измерение производить спустя 3 мин после установления каждого значения напряжения.

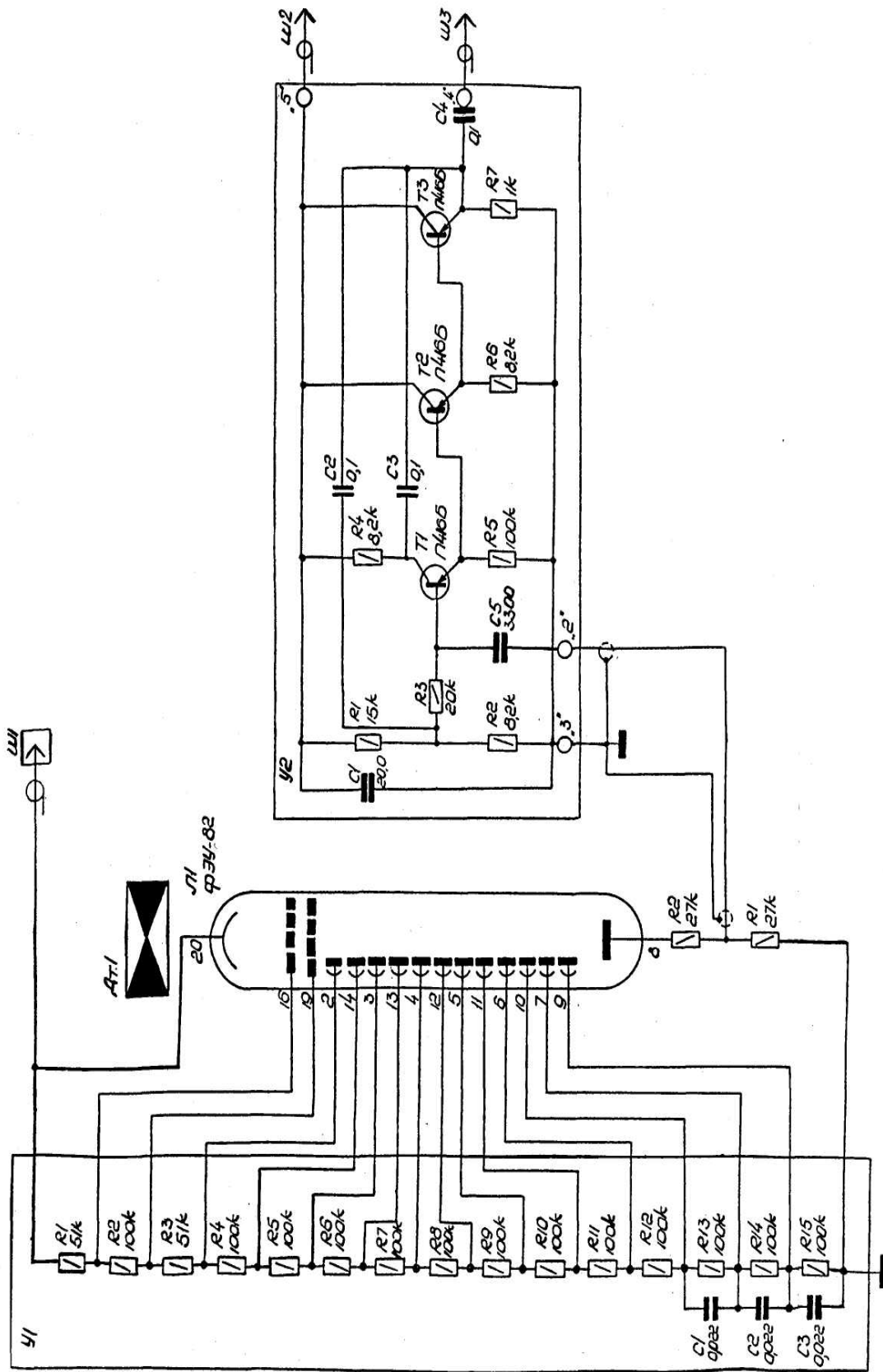


Рис. 2.3.5. Принципиальная схема сцинтиляционного детектора

Продолжительность измерения препарата и фона выбирать в зависимости от измеряемой интенсивности с таким расчетом, чтобы статистическая ошибка отсчета не превышала 10 %.

Для увеличения точности работы при каждом напряжении производить по три отсчета и брать среднее из полученных значений.

3.2.4. Принадлежности

Спектрометрический сцинтилляционный детектор типа БДИС 3-05.

3.2.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Перечень приборов и оборудования.
3. Основные теоретические сведения.
4. Порядок выполнения работы.
5. График характеристик сцинтилляционного гамма-счетчика.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

3.2.6. Контрольные вопросы

1. Описать принцип работы сцинтилляционного гамма-счетчика.
2. Основные характеристики ФЭУ.
3. Что такое сцинтилляции?
4. Назначение ФЭУ.
5. Что такое световыход?

Список использованных источников

1. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / под ред. С.В. Румянцева. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
2. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.: ил.
3. Тишкин П.А. Экспериментальные методы ядерной физики. – Л.: ЛГУ, 1970. – 232 с.
4. Иванов В.И. Курс дозиметрии: учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1970. – 392 с.
5. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. – М.: Наука, 1966. – 408 с.
6. Эстулин И.В. Практикум по ядерной физике. – М.: Физматгиз, 1962. – 260 с.: ил.

7. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: Справочник. В 7 т. / под общей ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль; кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.: ил.

3.3. Измерение векторной диаграммы чувствительности газонаполненного гамма-счетчика в зависимости от направления потока гамма-квантов

3.3.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы счетчика Гейгера–Мюллера, построить векторную диаграмму чувствительности.

3.3.2. Общие сведения

Счетчик Гейгера–Мюллера относится к ионизационным детекторам, работающим в режиме самостоятельного газового разряда.

Счетчик Гейгера–Мюллера имеет цилиндрическую форму: катодом служит металлический или стеклянный с металлическим покрытием цилиндр, анодом – тонкая металлическая нить, натянутая вдоль оси катода. Счетчики бывают самогасящиеся и несамогасящиеся.

Рассмотрим самогасящиеся счетчики: в них вторичные эффекты подавляются благодаря специальным добавкам к основному газу. Необходимо, чтобы компоненты рабочей смеси счетчика удовлетворяли следующему условию: потенциал ионизации гасящего газа должен быть меньше первого потенциала возбуждения основного газа. Электроны, образованные на следе заряженной частицы в газовом промежутке счетчика, под действием внешнего электрического поля дрейфуют к аноду. Вблизи нити анода напряженность электрического поля достаточна для ударной ионизации. Около нити анода возникают электронно-ионные лавины. Электроны, имеющие большую подвижность, быстро собираются на аноде, ионы создают около нити объемный положительный заряд, который понижает, в конечном счете, напряженность электрического поля вблизи нити до значения, при котором ударная ионизация уже невозможна, и активная стадия разряда заканчивается.

Время, в течение которого счетчик не регистрирует частицы, попадающие на него, называется мертвым временем.

Время, в течение которого положительные ионы проходят путь от анода до катода, называется временем восстановления.

Минимальный промежуток времени между двумя следующими друг за другом частицами, когда они регистрируются счетчиком раздельно, называется временем разрешения.

3.3.3. Эффективность счетчика

Эффективностью счетчика называется отношение числа зарегистрированных счетчиком частиц к полному числу прошедших через него частиц.

Счетчики Гейгера–Мюллера не обладают 100%-й эффективностью при регистрации частиц или гамма-квантов. Это обусловлено тем, что частица, прошедшая через счетчик, может не создать даже одной пары ионов (либо ионы продиффундируют в нерабочую область счетчика). Тем не менее, эффективность счетчика к электронам может достигать высоких значений (99 % и даже 99,9 %).

Регистрация гамма-лучей осуществляется через посредство быстрых электронов, образующихся при поглощении или рассеянии гамма-квантов, в основном в стенках счетчика (незначительно в газе). Эффективность счетчика для гамма-лучей зависит от материала стенок (катода) и энергии гамма-квантов.

В области энергий (0,1...1,5) МэВ, где электроны выбиваются из стенок катода, главным образом, в результате Комpton-эффекта, материал стенок счетчика мало влияет на эффективность, так как пробег электронов приблизительно обратно пропорционален атомному номеру z , а сечение эффекта пропорционально z .

В области больших энергий, где основным процессом поглощения гамма-квантов является образование электронно-позитронных пар, также выгодно изготавливать стенки счетчика из материала с большим z , так как сечение образования пар пропорционально z^2 .

Эффективность счетчиков для гамма-лучей обычно составляет $\sim 1\%$.

Отношение скоростей счета: вследствие влияния телесного угла при отсутствии асимметрии чувствительность счетчика равнялась бы:

$$\omega_{\max} / \omega_{\min}, \quad (1)$$

где ω_{\max} – максимальный телесный угол; ω_{\min} – минимальный телесный угол, под которым виден счетчик.

Наличие асимметрии чувствительности счетчика увеличивает это соотношение.

Зависимость чувствительности счетчика Гейгера–Мюллера от направления падающих лучей эмпирически установлена Г.М. Воскобойниковым и характеризуется следующим выражением:

$$g(\varphi) = g_0 \cdot \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 + \alpha} \quad (2)$$

где φ – угол, образованный лучами пучка с осью счетчика (в направлении длинной оси счетчика); α – коэффициент, различный для разных типов счетчиков; так, для счетчика МС-4 коэффициент $\alpha = 0,58$.

Для расходящегося пучка лучей может наблюдаться заметное расхождение между опытными результатами и результатами, полученными по формуле (2).

3.3.4. Порядок работы

1. Снять векторную диаграмму чувствительности счетчика для углов от 0° до 180° , образованных между направлением потока гамма-квантов от точечного источника и осью счетчика.

2. Построить векторную диаграмму для полученных и теоретических значений. Результаты сравнить между собой.

3.3.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Перечень приборов и оборудования.
3. Основные теоретические сведения.
4. Порядок выполнения работы.
5. График зависимости интенсивности регистрируемого излучения от угла поворота источника относительно счетчика.
6. Выводы.

3.3.6. Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия самогасящегося счетчика Гейгера–Мюллера.

2. Объяснить наличие зависимости чувствительности счетчика от направления падающих лучей.

Список использованной литературы

1. Техническое описание радиометра-Б4.
2. Практикум по ядерной физике / под ред. В.О. Сергеева. – М.: Высшая школа, 1975.
3. Тишкин П.А. Экспериментальные методы ядерной физики. – Л.: ЛГУ, 1970. – 232 с.

3.4. Определение коэффициента использования гамма-излучения и эффективности газонаполненных счетчиков

3.4.1. Цель работы

Определить коэффициент использования гамма-излучения в газонаполненном счетчике Гейгера–Мюллера и эффективности газонаполненных счетчиков.

3.4.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда

Для понимания физической сущности процесса, рассмотрим подробнее вольт-амперную характеристику газового разряда, а именно область Гейгера, а также счётчик Гейгера–Мюллера.

Газовым разрядом называют явление протекания ионизационного тока через газы. Он определяется свойствами газа и излучения, приложенным к электродам напряжением и формой электродов. Вольт-амперная характеристика показывает зависимость ионизационного тока J от напряжения на электродах U счетчика при постоянной интенсивности ионизирующего излучения в газе (рис. 3.4.1). При увеличении напряжения ток J сначала растет, затем на некотором интервале напряжений остается почти постоянным, после чего снова возрастает.

Сложная зависимость тока J от напряжения U связана с особенностью физических процессов, протекающих в газе при движении ионов в межэлектродном пространстве. Для понимания физической сущности процессов разобьем вольт-амперную характеристику на шесть участков. На первом участке, заключенном в интервале напряжений от нуля до U_1 , ток J пропорционален напряжению U . Этот участок называют областью закона Ома. Если обозначить сопротивление газа протеканию ионизационного тока буквой R , то:

$$J = U / R. \quad (1)$$

В области закона Ома не все ионы, образованные в газе, достигают электродов. Часть ионов, двигаясь в газе, рекомбинирует. С увеличением напряжения растет скорость направленного движения ионов. Поэтому вероятность рекомбинации ионов уменьшается, и на электроды попадает все больше и больше ионов.

В конце первого участка наблюдается отклонение от закона Ома. Хотя рекомбинация в этом интервале напряжений и оказывает влияние на газовый разряд, однако ток J уже не пропорционален напряжению U .

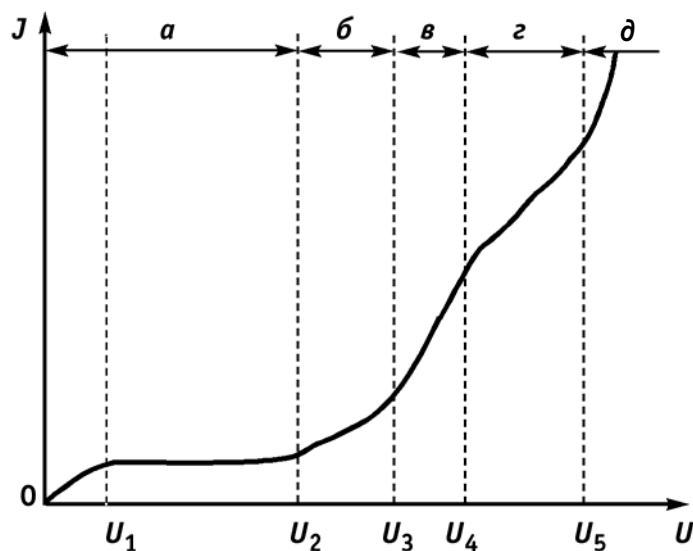


Рис. 3.4.1. Вольт-амперная характеристика газового разряда:
a – область ионизационной камеры; *б* – пропорциональная область;
в – область ограниченной пропорциональности; *г* – область Гейгера;
д – область самостоятельных разрядов

На втором участке напряжений, от U_1 до U_2 , ионизационный ток практически постоянен, почти все ионы первичной ионизации собираются на электродах, а других источников зарядов в газе нет. Эту область вольт-амперной характеристики называют областью насыщения, а ток – током насыщения J_H . Заметим, что кривая тока в области насыщения имеет небольшой подъем. Он вызывается небольшой рекомбинацией ионов и другими второстепенными факторами.

В области насыщения ионы испытывают упругое рассеяние на молекулах газа. Кинетическая энергия, получаемая ионами от электрического поля, еще недостаточна для ионизации молекул. Однако при напряжении $U > U_2$ легкие подвижные электроны между двумя последовательными столкновениями ускоряются до такой кинетической энергии, которой хватает для ионизации молекул. Эту ионизацию, в отличие от первичной, называют вторичной.

Электроны вторичной ионизации вместе с электронами первичной ионизации в последующих столкновениях ионизируют другие молекулы. Происходит лавинообразное размножение зарядов. В объеме газа возникает дополнительный к первичной ионизации источник зарядов.

Поэтому ионизационный ток при напряжениях $U > U_2$ возрастает, и тем больше, чем выше напряжение.

Явление размножения зарядов в газе называют газовым усилением. Оно характеризуется коэффициентом газового усиления k , который равен отношению ионизационного тока в газе J к току насыщения J_H :

$$k = J / J_N. \quad (2)$$

В токе J учитывается вклад и первичной, и вторичной ионизации. Ток J_N обуславливается только первичной ионизацией. Он течет через газ в том случае, когда детектор работает в режиме насыщения.

В третьей области напряжений ($U_2 < U < U_3$) коэффициент k зависит только от напряжения U :

$$k = f(U). \quad (3)$$

С ростом напряжения коэффициент k увеличивается от 1 ($U = U_2$) до $10^3 \dots 10^4$ ($U = U_3$). В третьей области ионизационный ток пропорционален первичной ионизации J_N . Поэтому третью область называют областью пропорциональности.

Верхняя граница третьей области обуславливается величиной первичной ионизации. С ростом интенсивности излучения в объеме детектора увеличивается плотность ионов, возникающих при вторичной ионизации. Электроны собираются на аноде за очень короткий промежуток времени. За этот промежуток положительные ионы, имеющие сравнительно большую массу, практически не изменяют своего положения. Находясь в межэлектродном пространстве, они экранируют электрическое поле между электродами, в результате чего напряженность поля E падает. С увеличением коэффициента газового усиления возрастает экранировка электродов. В свою очередь, эффект экранировки уменьшает коэффициент k и газовое усиление ослабляется. Следовательно, с увеличением первичной ионизации напряжение верхней границы третьей области пропорциональности уменьшается.

В области пропорциональности пространственный положительный заряд сравнительно невелик. Он еще не влияет на газовое усиление. Поэтому коэффициент k и не зависит от первичной ионизации. За областью пропорциональности лежит область ограниченной пропорциональности. Пространственный заряд в газе становится настолько большим, что коэффициент газового усиления в этой области зависит уже и от напряжения, и от первичной ионизации.

Начиная с напряжения $U > U_4$, коэффициент k возрастает настолько сильно, что величина тока становится независимой от первичной ионизации. Для возникновения газового разряда достаточно появиться в детекторе хотя бы одной ионной паре. Вторичная ионизация в пятой области определяет значение ионизационного тока.

Эту область вольт-амперной характеристики называют областью Гейгера–Мюллера или кратко областью Гейгера.

Газовый разряд во всех пяти областях несамостоятелен. Он не может протекать без внешнего воздействия. В области напряжений $U > U_5$ в газе начинается самостоятельный газовый разряд, возникающий без

наличия излучения в детекторе. Напряженность электрического поля становится вполне достаточной, чтобы вырвать электроны из электродов. При более высоких напряжениях начинается пробой газа.

В первой и второй областях напряжений работают ионизационные камеры. Эти области напряжений объединяют вместе и называют областью ионизационной камеры. Третья область – это область пропорциональных счетчиков, пятая – счетчиков Гейгера. Четвертую область обычно не используют, так как в ней, во-первых, коэффициент газового усиления зависит от напряжения и первичной ионизации и, во-вторых, ионизационный ток значительно меньше, чем в области Гейгера.

3.4.3. Счетчик Гейгера-Мюллера

1. Особенности газового разряда

В пропорциональном счетчике газовый разряд развивается только в части объема газа. В ней образуется сначала первичная ионизация, а затем и лавина электронов. Остальной объем не охватывается газовым разрядом.

С повышением напряжения критическая область расширяется. В ней увеличивается концентрация возбужденных молекул, а, следовательно, и количество испущенных фотонов. Под действием фотонов из катода и молекул газа вырывается все больше и больше фотоэлектронов. Эти фотоэлектроны, в свою очередь, дают начало новым лавинам электронов в объеме счетчика, не занятом газовым разрядом от первичной ионизации. Таким образом, повышение напряжения U приводит к распространению газового разряда по объему счетчика. При некотором напряжении U_n , называемом пороговым, газовый разряд охватывает весь объем счетчика.

В области ограниченной пропорциональности число фотоэлектронов N , возникающих в процессе газового разряда, сравнимо с числом первичных электронов N_0 . Фотоэлектроны оказывают в этой области значительное влияние на течение газового разряда и дают заметный вклад в ионизационный ток. Коэффициент газового усиления по уравнению

$$k = k_0 \cdot (1 + L) \quad (4)$$

состоит из двух сомножителей. Первый сомножитель k_0 – это коэффициент газового усиления, если в газе нет фотоэлектронов ($L = 0$). Он является функцией напряжения U . Вторым сомножителем $(1 + L)$ учитывается вклад в газовое усиление фотоэлектронов. Так как количество фотоэлектронов N_L увеличивается с повышением напряжения, а величина $L = N_L / N_0$, то второй сомножитель зависит от двух переменных: напряжения U и числа первичных пар ионов N_0 . Следовательно, в области

ограниченной пропорциональности коэффициент газового усиления является функцией U и N_0 .

При напряжении U_n начинается область Гейгера–Мюллера. Количество фотоэлектронов N_L , участвующих в газовом разряде, становится намного больше числа первичных электронов N_0 , т. е. $L = (N_L / N_0) \gg 1$. Это означает, что один первичный электрон порождает в лавинах огромное число фотоэлектронов. Поэтому вклад первичной ионизации в ионизационный ток настолько мал, что им можно пренебречь.

Заменим в уравнении $(1 + L) \approx N_1 / N_0$, а отношение J_N / N_0 – на элементарный заряд e . Тогда ионизационный ток

$$J = k_0 \cdot e \cdot N_1. \quad (5)$$

Он независим от числа первичных пар ионов N_0 . Газовый разряд охватывает одинаково весь объем счетчика при появлении в газе и одной, и нескольких тысяч ионных пар. Это является одной из особенностей газового разряда в счетчике Гейгера–Мюллера.

После удаления из газа электронов, около нити располагаются положительные ионы. Они образуют вокруг нити плотный чехол по всей длине счетчика. Положительные ионы сильно экранируют электрическое поле, и напряженность электрического поля вблизи нити резко уменьшается. Вследствие этого в счетчике становится невозможным новый газовый разряд, пока положительные ионы не отойдут от нити на определенное расстояние.

Предположим, что в счетчик длительное время не поступает очередная заряженная частица. Возникнет ли снова лавина электронов в счетчике? Положительные ионы за 10^{-4} с достигают катода, нейтрализуются и испускают фотоны. В свою очередь, фотоны вырывают из катода фотоэлектроны, и в объеме счетчика начинается первый послеразряд, за которым возникнет второй послеразряд и т. д. Таким образом, первичная ионизация порождает в объеме счетчика незатухающий газовый разряд. Счетчик Гейгера–Мюллера, в котором протекает незатухающий газовый разряд, непригоден как детектор ядерного излучения.

Для нормальной работы счетчика Гейгера–Мюллера необходимо оборвать длительный газовый разряд сразу же после первого основного разряда. Тогда появлению заряженной частицы в газе будет соответствовать один импульс напряжения. По способу гашения газового разряда счетчики Гейгера–Мюллера подразделяют на самогасящиеся и несамогасящиеся. В самогасящихся счетчиках газовый разряд гасится газонаполнителем, в несамогасящихся – внешними устройствами.

2. Электрическая схема включения

Электрическая схема включения счетчика Гейгера–Мюллера ничем не отличается от электрической схемы включения пропорционального

счетчика. Заряженная частица, пролетая через газ, обуславливает образование импульса напряжения на сопротивлении R (точка А).

На значение амплитуды импульса влияет коэффициент газового усиления. В счетчике Гейгера–Мюллера амплитуда импульсов возрастает до (1...50) В. Такие импульсы можно регистрировать с помощью простейшего усилителя, состоящего из одного усилительного элемента.

Для гашения газового разряда в счетчике необходимо создать условия, при которых становится невозможным появление послеразряда, а вместе с ним и ложного импульса. В несамогасящихся счетчиках газовый разряд гасится выбором сопротивления R , при котором постоянная времени $\tau = RC$ превышает на два порядка время движения положительных ионов от анода к катоду. Сопротивление R и выполняет роль внешнего гасителя газового разряда.

После начала газового разряда напряжение U на сопротивлении R падает настолько значительно, что оно становится меньше порогового U_n . Такое напряжение собирающего электрода поддерживается примерно в течение 10^{-2} с.

Положительные ионы первой лавины подходят к катоду через 10^{-4} с, затем в газе появляются фотоэлектроны. Так как $U < U_n$, то в газе протекает затухающий газовый разряд. В течение 10^{-2} с газовый разряд в счетчике затухает, и счетчик снова может зарегистрировать заряженную частицу.

Несамогасящиеся счетчики наполняют чистыми газами: аргоном, неоном, азотом и др. Разрешающее время несамогасящихся счетчиков составляет 10^{-2} с. Поэтому ими регистрируют небольшие потоки частиц. В самогасящихся счетчиках газовый разряд гасится внутри самого счетчика. Для этого к чистому газу (аргон, неон, гелий и др.) добавляют гасящую примесь органических многоатомных молекул (пары спирта и др.).

Небольшие добавки примесных молекул не оказывают большого влияния на образование первичной лавины электронов. Поэтому развитие лавины электронов в самогасящихся счетчиках мало отличается от развития лавины в счетчике, наполненном чистым газом.

Возбужденные молекулы аргона, возникающие в первой лавине, испускают фотоны. Аргон прозрачен для фотонов и пропускает их на катод. Примесный газ, имеющий большой коэффициент линейного ослабления, интенсивно поглощает фотоны. Так, коэффициент линейного ослабления смеси, состоящей из 90 % аргона и 10 % паров спирта, при давлении 100 мм рт. ст. составляет примерно 10 см^{-1} . Если диаметр счетчика равен 4 см, то на анод проникает доля фотонов:

$$(e^{-\mu R} / \mu R) = (e^{-20} / 20) \approx 10^{-10}. \quad (6)$$

Так как в одной лавине возникает около 10^{10} возбужденных молекул аргона, то практически все фотоны поглощаются газом и не попадают на катод. Положительные ионы аргона, сталкиваясь с многоатомными молекулами, отнимают у молекул по одному электрону и нейтрализуются. Ионы многоатомных молекул сначала превращаются на катоде в возбужденные молекулы, а затем диссоциируют так же, как и возбужденные многоатомные молекулы, поглотившие фотоны.

За один газовый разряд в счетчике диссоциирует около 10^{10} многоатомных молекул.

Диссоциация многоатомных органических молекул – необратимый процесс, поэтому количество примеси-гасителя в счетчике уменьшается, и счетчик постепенно меняет свои свойства и приходит в негодность. Хорошим заменителем органических молекул в самогасящихся счетчиках служат галогены Cl_2 , Br_2 , I_2 . Молекулы галогенов легко отдают электроны при столкновении с положительными ионами аргона. Возбужденные молекулы галогенов расходуют свою энергию возбуждения на диссоциацию. Следовательно, галогены обладают гасящими свойствами. Счетчики Гейгера–Мюллера, в которых газом-гасителем служат галогены, называют галогенными. Галогены имеют значительно больший порядковый номер, чем органические вещества. Они эффективнее поглощают фотоны. Поэтому добавка молекул галогенов к аргону составляет всего 0,1 % вместо (10–15) % органических молекул. Кроме того, диссоциация молекул галогенов – обратимый процесс. Атомы галогенов при столкновении рекомбинируют в молекулу, вследствие чего количество молекул галогенов в счетчике остается неизменным. Это выгодно отличает галогенные счетчики от счетчиков с добавками паров органических веществ.

Галогены относятся к химически активным газам. При конструировании галогенных счетчиков особое внимание обращают на выбор материалов. Для корпуса галогенных счетчиков, например, нельзя использовать стекло, алюминий и медь, которые вступают в химическую реакцию с галогенами. Поэтому корпус приходится изготавливать из нержавеющей стали.

Разрешающее время самогасящихся счетчиков значительно меньше, чем несамогасящихся. Амплитуда очередного импульса превышает порог чувствительности тогда, когда положительные ионы отходят от анода на определенное расстояние. Этот радиус r_0 зависит от перенапряжения $(U - U_n)$, где U_n – пороговое напряжение. Чем больше перенапряжение, тем меньше r_0 и разрешающее время τ_p . Так, у аргоно – спиртовых счетчиков с давлением 100 мм рт. ст. разрешающее время τ_p уменьшается от 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-5}$ с при повышении перенапряжения от 300 до 1200 В.

Отметим особенности распространения газового разряда по объему счетчика Гейгера–Мюллера. В несамогасящихся счетчиках фотоэлектроны возникают во всем объеме газа. Поэтому газовый разряд охватывает весь объем счетчика за время, сравнимое со временем сбора электронов на аноде. В самогасящихся счетчиках почти все фотоны поглощаются в критической области, так как газ-наполнитель характеризуется большим коэффициентом линейного ослабления. Поэтому газовый разряд распространяется только вдоль нити, занимая небольшой объем счетчика.

Амплитуда импульса в самогасящихся счетчиках зависят от доли длины нити, на которую распространяется газовый разряд. Максимальная амплитуда импульса наблюдается в том случае, когда газовый разряд охватывает всю длину нити. Поэтому к состоянию поверхности нити предъявляются жесткие требования. Поверхность нити тщательно полируют, чтобы устранить все неровности. Появление неровностей на поверхности может привести к тому, что газовый разряд начнет охватывать не всю нить и амплитуда импульса уменьшится.

3. Рабочие характеристики

Пороговое напряжение

Пороговое напряжение зависит от природы газа-наполнителя и его давления. С повышением давления газа пробег электронов в газе укорачивается. Вследствие этого электрон получает от электрического поля между двумя столкновениями с молекулами газа меньше энергии. Для увеличения энергии ускоряемых электронов необходимо более высокое напряжение.

Каждый газ имеет определенную энергию ионизации $\varepsilon_{и}$. Так, для аргона $\varepsilon_{и} = 15,7$ эВ, для неона – 21,5 эВ и т. д. Вторичная ионизация молекул наиболее вероятна при энергиях, превышающих в несколько раз энергию ионизации. При меньших энергиях электрона в большинстве столкновений образуются возбужденные молекулы. Следовательно, чем больше энергия ионизации газа-наполнителя, тем выше пороговое напряжение. Для счетчиков Гейгера–Мюллера, заполненных чистыми газами (аргоном, неоном и др.) или чистыми газами с примесью органических молекул, пороговое напряжение лежит в пределах (800...1300) В, а для галогенных счетчиков оно составляет примерно 600 В.

В галогенных счетчиках, наполненных неоном с малыми примесями аргона (0,1 %) и галогена (0,1 %), пороговое напряжение снижается до 300 В. Небольшое пороговое напряжение объясняется особенностью газового разряда, протекающего в такой смеси газов.

Среди возбужденных атомов некоторых веществ встречаются метастабильные атомы. Они имеют сравнительно продолжительное время жизни. Если время жизни большинства возбужденных атомов составляет около 10^{-8} с, то у метастабильных атомов возбужденное состояние длится на несколько порядков дольше. У неона первый возбужденный уровень с энергией 16,6 эВ метастабильен.

Если энергия первичных электронов намного превышает энергию ионизации аргона, равную 15,7 эВ, то в счетчике происходит не лавинное размножение электронов, а накопление метастабильных атомов неона. Энергия возбуждения атомов неона (16,6 эВ) больше энергии ионизации атомов аргона (15,7 эВ). При столкновении возбужденный атом неона передает энергию возбуждения атому аргона и ионизирует его. В таких столкновениях и порождается лавина электронов в газе.

Пороговое напряжение снижается за счет ионизации аргона возбужденными атомами неона. Для работы такого галогенного счетчика необходимы низкие напряжения, при которых атомы неона при столкновениях с электронами переводятся в метастабильное состояние.

Время разрешения

Поскольку коронный газовый разряд, вызванный в счетчиках Гейгера ионизирующей частицей, длится до тех пор, пока импульс напряжения на эквивалентной емкости C не скомпенсирует перенапряжение на газоразрядном промежутке, в течение всего времени нарастания импульса счетчик никак не реагирует на попадание в него следующей ионизирующей частицы. Если бы сопротивление утечки R было бесконечно велико, то емкость C сохраняла бы заряд, а счетчик – состояние нечувствительности сколь угодно долго. На самом деле сопротивление R хоть и велико, но конечно. Поэтому с течением времени емкость C разряжается и перенапряжение на газоразрядном промежутке постепенно восстанавливается. Так как, однако, величина сопротивления утечки R лимитирована условием $R > R_{\text{внутр}}$, разряд емкости C происходит крайне медленно. В соответствии с этим импульс, обладая сравнительно небольшим временем нарастания ($\sim 10^{-4}$ с), имеет очень длинный экспоненциальный спад, определяемый постоянной времени RC ($\sim 10^{-2}$ с).

Типичная форма импульса в счетчике Гейгера изображена на рис. 3.4.2.

Ионизирующая частица сможет вызвать в счетчике вспышку газового разряда, приводящую к образованию импульса с номинальной амплитудой, равной перенапряжению ($V_0 - V_{\text{зак}}$), только в том случае, когда она следует за предшествовавшей ей частицей через очень большой промежуток времени, достаточный для того, чтобы емкость C разрядилась почти до нуля. Нетрудно видеть, однако, что счетчик будет чувст-

вителен и к частицам, попадающим в него значительно раньше, еще до того, как емкость C полностью потеряет свой заряд. Действительно, коронный разряд может вспыхнуть и при перенапряжениях на счетчике, меньших чем $(V_0 - V_{зак})$. При этом разряд в счетчике будет протекать обычным путем, но амплитуда импульса окажется несколько меньше – в соответствии с величиной перенапряжения на газоразрядном промежутке в этот момент времени. Такой импульс изображен на рис. 3.4.2 пунктиром. Очевидно, что чем меньше интервал времени, разделяющий две следующие друг за другом частицы, тем меньше и амплитуда второго импульса. Вторая частица будет зарегистрирована только в том случае, если амплитуда образованного частицей импульса превысит порог срабатывания электронного устройства, используемого для счета импульсов.

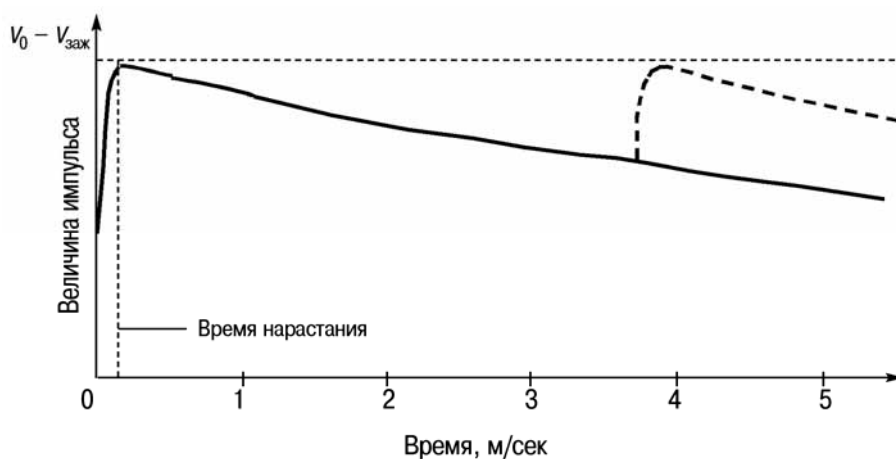


Рис. 3.4.2. Типичная форма импульса в счетчике Гейгера

Это означает, что на практике разрешающая способность счетчиков Гейгера зависит от чувствительности электронного устройства.

Поскольку номинальные значения амплитуд импульсов от счетчиков Гейгера достаточно велики (десятки вольт), используемые электронные устройства имеют, как правило, довольно высокие пороги срабатывания (вольты). Поэтому время разрешения счетчиков Гейгера составляет обычно несколько миллисекунд и превышает время нарастания импульса примерно на порядок.

Разрешающую способность счетчиков Гейгера можно увеличить на порядок и более, используя принцип принудительного гашения разряда. Действие любой электронной схемы для принудительного гашения разряда в счетчике Гейгера основано на том, что при поступлении на ее вход небольшого импульса напряжения, отвечающего началу разряда в счетчике, в схеме очень быстро генерируется большой импульс, знак и амплитуда которого подбираются таким образом, чтобы полностью снять перенапряжение $(V_0 - V_{зак})$ с газоразрядного промежутка; дли-

тельность же гасящего импульса τ должна несколько превышать время деионизации газа в счетчике: $\tau > T_+$. Величина сопротивления утечки R при этом ничем не лимитирована и может быть совсем небольшой (обычно $10^8 \dots 10^6$ Ом). Таким образом, при использовании схемы для принудительного гашения разряда время разрешения счетчика Гейгера будет порядка времени собирания положительных ионов.

Счетная характеристика

До порогового напряжения U_n счетчик работает в области ограниченной пропорциональности (рис. 3.4.3). Амплитуды импульсов еще зависят от первичной ионизации и отличаются по своим значениям. С повышением напряжения амплитуда импульса возрастает и через усилитель пропускается все больше и больше импульсов.

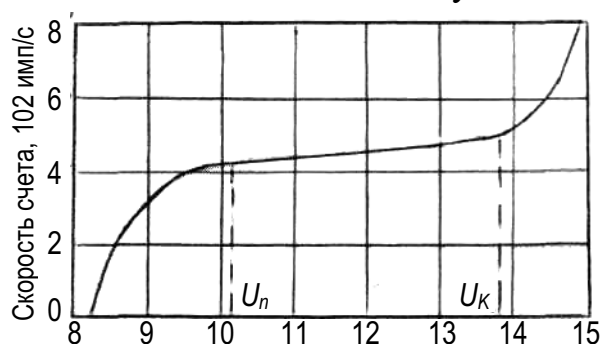


Рис. 3.4.3. Счетная характеристика счетчика Гейгера–Мюллера

При $U > U_n$ каждая регистрируемая частица сопровождается импульсом, амплитуда которого больше порога чувствительности усилителя. Поэтому скорость счета при постоянной интенсивности излучения становится почти неизменной.

Плато счетчика имеет подъем, обусловленный появлением ложных импульсов. В самогасящихся счетчиках небольшая доля фотонов и ионов аргона достигает катода. Они обуславливают некоторую вероятность возникновения послеразряда и ложного импульса. С повышением напряжения вероятность появления ложного импульса увеличивается. В конце плато при $U = U_K$ ложных импульсов становится так много, что скорость счета резко возрастает.

В несамогасящихся счетчиках ложные импульсы появляются совершенно по другим причинам. Среди возбужденных атомов газа могут быть и метастабильные. После восстановления свойств счетчика метастабильные атомы испускают фотоны. Они вырывают из катода фотопоток, который и дает ложный импульс.

Качество счетчика Гейгера–Мюллера характеризуется протяженностью плато и его наклоном. Хорошие счетчики имеют плато протяжен-

ностью от 100 до 300 В и наклон плато в несколько процентов. Протяженность и наклон плато самогасящихся счетчиков с примесями органических молекул изменяются с течением времени.

С уменьшением количества примесных молекул ухудшаются гасящие свойства газа и возрастает вероятность появления ложного импульса. Вследствие этого протяженность плато укорачивается, а его наклон увеличивается.

Счетная характеристика снимается перед началом измерения. Наличие плато в счетной характеристике делает счетчик Гейгера–Мюллера очень удобным детектором. Рабочую точку выбирают посередине плато, чтобы на скорость счета не влияли небольшие колебания напряжения на электродах.

Эффективность

Для заряженных частиц эффективность счетчика близка к 100 %. Счетчик регистрирует все заряженные частицы, если они появляются в газе с интервалом времени, большим разрешающего времени, и образуют в газе хотя бы одну пару ионов. Эффективность регистрации гамма-квантов значительно меньше. Она не превышает (1–2) %.

Срок службы

Несамогасящиеся и галогенные счетчики характеризуются длительным сроком службы. Он ограничивается нарушениями в конструкции счетчика. Так, на поверхности нити галогенных счетчиков могут появиться неровности. Они замедляют скорость распространения газового разряда по объему или обрывают его в части объема.

Самогасящиеся счетчики с примесью паров органических веществ содержат 10^{19} – 10^{20} многоатомных молекул. В каждом разряде диссоциирует примерно 10^{10} таких молекул. Поэтому счетчик регистрирует не более 10^9 – 10^{10} заряженных частиц.

Конструкция и применение счетчиков Гейгера–Мюллера

Цилиндрический счетчик (рис. 3.4.4, а) состоит из цилиндрической трубки-корпуса, по оси которого натянута металлическая нить. Корпус служит катодом, а нить – анодом. Металлическую нить чаще всего выполняют из вольфрама. Поверхность нити полируют, чтобы исключить влияние неровностей на распространение газового разряда вдоль нити.

Корпус счетчика изготавливают из различных материалов, которые выбирают в зависимости от типа регистрируемого ядерного излучения. При регистрации β -частиц корпус выполняют из алюминия, меди и нержавеющей стали. Чтобы β -частицы не поглощались материалом кор-

пуса, его делают тонкостенным. Для увеличения жесткости тонкостенный корпус гофрируют.

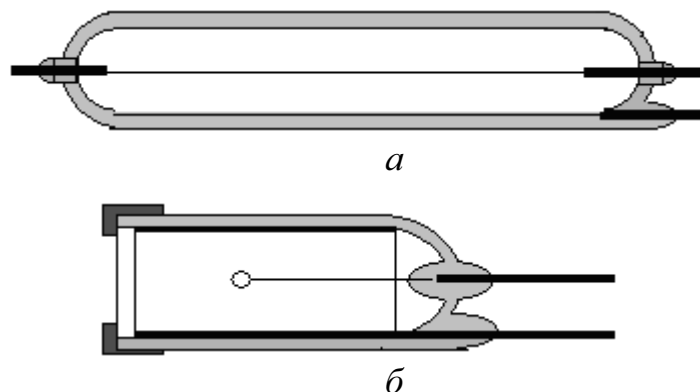


Рис. 3.4.4. Конструкция цилиндрического (а) и торцового (б) счетчиков Гейгера–Мюллера

Корпус счетчика гамма-квантов представляет собой стеклянный баллон. На внутреннюю поверхность баллона наносят электропроводящий слой меди, который служит катодом. Толщина стеклянной стенки должна быть немного больше длины пробега электронов, вырываемых из стенки гамма-квантами. При такой толщине стенки в газ выходит максимальная доля электронов, а поток гамма-квантов почти не изменяется в стенке.

Цилиндрические счетчики применяют в дозиметрии для измерения мощности дозы излучения. Их используют также в промышленности, например для контроля толщины проката. Источник гамма-квантов устанавливают с одной стороны движущегося проката, а счетчик – с другой; часть гамма-квантов поглощается в металле, а другая попадает в счетчик; по скорости счета гамма-квантов и определяют толщину проката.

Разновидностью цилиндрического счетчика является торцовый счетчик (рис. 3.4.4, б). Его используют в основном для регистрации альфа- и бета-частиц. Один из торцов корпуса закрывают тонкой пленкой из слюды или другого материала. Через пленку в счетчик проникают заряженные частицы. Анодом счетчика служит нить с бусинкой на конце. Корпус торцового счетчика изготавливают из стекла. На внутреннюю поверхность стекла наносят слой меди – катода.

В простой ионизационной камере или в кристаллическом счетчике проводимости ионы и электроны, образованные частицей в рабочем веществе детектора, перемещаются под действием электрического поля, что приводит к появлению тока во внешней цепи детектора. Величина тока может служить мерой ионизационного эффекта, созданного попавшей в камеру частицей. В ионизационной камере с газовым усиле-

нием (газонаполненный пропорциональный счетчик) электрическое поле используется не только для собирания ионов и электронов, образованных частицей в газе, наполняющем камеру, но и для значительного увеличения ионизационного эффекта за счет вторичной ионизации, происходящей при соударениях электронов, ускоренных электрическим полем, с атомами или молекулами газа. Сила тока во внешней цепи детектора зависит в этом случае как от величины первоначальной ионизации, созданной в детекторе ионизирующим агентом, так и от величины газового усиления. При очень больших газовых усилениях полный ионизационный эффект перестает зависеть от величины первоначальной ионизации и определяется только свойствами самого детектора. В такого рода детекторах, называемых счетчиками с самостоятельным газовым разрядом (счетчики Гейгера), величина первоначального ионизационного эффекта измерена быть не может и регистрируется только его наличие.

3.4.4. Общие сведения

Чтобы охарактеризовать чувствительность аппаратуры к излучению, используют три коэффициента: k, j, g .

Коэффициентом использования излучения в приборе (коэффициентом счетности) « k » называется отношение числа сосчитанных прибором импульсов « h » к числу гамма-квантов или частиц N , испускаемых источником в тот же промежуток времени.

Коэффициентом использования « j » гамма-излучения в счетчике называется отношение числа сосчитанных импульсов к числу частиц или гамма-квантов, попавших за это время на счетчик.

Эффективностью счетчика « q » называется отношение числа сосчитанных импульсов к числу частиц или гамма-квантов, попавших в чувствительный объем счетчика.

Коэффициент использования гамма-излучения в счетчике равен эффективности счетчика « q », т. к. поглощением гамма-излучения в счетчике можно пренебречь.

Коэффициент использования гамма-излучения в приборе зависит от геометрических условий измерения и эффективности счетчика. Для определения коэффициента использования гамма-излучения в приборе используют эталон радия, находящегося в равновесии с продуктами распада. Один грамм радия дает $(3,61 \pm 003) \cdot 10^{10}$ расп/с, причем на один распад равновесного радия приходится 2,3 гамма-квантов). Таким образом, 1 г. радия испускает в одну секунду $2,3 \cdot 3,61 \cdot 10^{10}$ гамма-квантов.

Если применяемый эталон содержит Q грамма радия, то число гамма-квантов, испускаемых эталоном, равно:

$$N = 8,3 \cdot 10^{10} \cdot Q \cdot t, \quad (7)$$

где t – продолжительность измерения, с.

Если число сосчитанных радиометром за время t импульсов равно n , то коэффициент использования гамма-квантов в приборе:

$$K = n / N \cdot 100 \%. \quad (8)$$

При определении эффективности счетчика или коэффициента использования гамма-излучения в нем, следует найти число гамма-квантов, попадающих на счетчик, т. е. в общее число испускаемых гамма-квантов внести поправку на «геометрию» (учесть телесный угол). Эта поправка может быть получена следующим путем: излучение от радиоактивного препарата малых размеров распространяется в телесном угле 4Ω . На счетчик попадает небольшая доля излучения, определяемая величиной относительного телесного угла, под которым счетчик виден из источника. Этот угол определяется формулой:

$$4\Omega = S / r^2, \quad (9)$$

где S – проекция катода счетной трубки на поверхность сферы радиусом r ; следовательно на счетчик попадает $N_i = N \cdot \Omega$ гамма-квантов.

$$K_i = n / N \cdot \Omega \cdot 100 \%. \quad (10)$$

3.4.5. Порядок проведения работы

Определить коэффициент использования гамма-излучения в счетчике Гейгера–Мюллера, для чего необходимо:

1. Подготовить аппаратуру регистрации к работе, определить фон.
2. Поместив источник на расстояние 1 м от счетчика, определить число импульсов, сосчитанных прибором за определенный промежуток времени. Для уменьшения влияния рассеянного излучения источник и счетчик должны располагаться на расстоянии 1,5 м от пола и стен.
3. Вычислить число импульсов от гамма-излучения эталона: по формулам 7–10 найти коэффициенты.

3.4.6. Список оборудования

Лабораторная счетная установка для гамма-измерений, источник гамма-излучения, секундомер, метр.

3.4.7. Содержание отчета

1. Краткое изложение материала с описанием основных технических характеристик счетной установки
2. Привести результаты измерений и расчеты.

3.4.8. Контрольные вопросы

1. Дать понятие коэффициента использования гамма-излучения прибора.
2. Дать понятие коэффициента использования гамма-излучения счетчика.
3. Дать понятие эффективности счетчика.

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1987. – 392 с.
2. Юдин М.Ф. Дозиметрия фотонного излучения. – М.: Изд-во Госстандарта, 1970. – 275 с.
3. Калашников В.И., Козодоев М.С. Детекторы элементарных частиц. – М.: Наука, 1966. – 315 с.
4. Левин В.Е., Хамьянов Л.П. Измерение ядерных излучений. – М.: Атомиздат, 1962. – 293 с.

3.5. Детекторы излучений для дозиметрии

3.5.1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы детекторов ионизирующих излучений и методикой измерения на экспериментальной установке с использованием в качестве источника излучения бетатрона.

3.5.2. Задание

1. Изучить механизм взаимодействия излучения с газовой средой и сцинтилляционным кристаллом.
2. Изучить устройство детекторов излучения.
3. Снять кривые распределения мощности дозы пучка электронного излучения бетатрона.
4. Снять вольт-амперную характеристику ионизационной камеры.

3.5.3. Теоретическая часть

Для регистрации и измерения характеристик излучений применяют различные детекторы и приборы. В настоящее время известно большое количество методов и детекторов измерения излучений, причем невозможно указать какой-либо один универсальный метод, пригодный для всех случаев в практике.

Отсутствие такого универсального метода объясняется большим разнообразием задач, с которыми приходится сталкиваться при регистрации излучений. Так, например, в зависимости от конкретных условий бывает необходимо измерять либо дозу излучения, либо интенсивность

излучения, либо производить спектральные измерения. Действие детекторов, используемых в приборостроении, основано на первичных или вторичных эффектах, возможных при взаимодействии излучений с веществом. Работа детекторов, в конечном счете, сводится к ионизирующему действию в газах, твердых веществах или жидкостях.

Излучение оказывает ионизирующее воздействие на вещество, которое используется в детекторе. При этом заряженная частица, проходя через детектор, теряет энергию за счет столкновений, актов возбуждения атомов или вторичных эффектов излучений. Например, величина энергии, затрачиваемая на образование одной пары ионов в газонаполненном счетчике, лежит в диапазоне (24...40) эВ (в зависимости от газа). В кремниевом полупроводниковом детекторе средняя энергия, расходуемая на образование одной ионно-дырочной пары, равна 3,6 эВ. В сцинтилляционном детекторе потери энергии на образование одного фотоэлектрона составляют (200...500) эВ.

Газонаполненные детекторы

Газонаполненные детекторы, благодаря хорошей чувствительности к излучениям разных видов, простоте и дешевизне, являются самыми распространенными приборами регистрации. Такой детектор представляет собой наполненную газом оболочку, в объем которой введены два электрода (рис. 3.5.1). Цилиндрический счетчик состоит из металлизированной стеклянной трубки 1 и тонкой металлической нити 2, натянутой на оси цилиндра. Нить служит анодом, трубка – катодом.

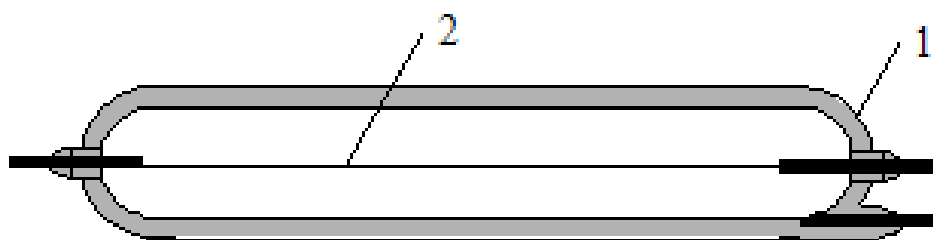


Рис. 3.5.1. Цилиндрический счетчик

Торцовый счетчик (рис. 3.5.2) имеет входное окно 3. Обычно торцовые счетчики используют для регистрации α - и β -излучений. Поэтому окно счетчика покрывают тончайшей органической пленкой или тонкой пластинкой слюды. В качестве наполняющих газов используют аргон, неон и водород.

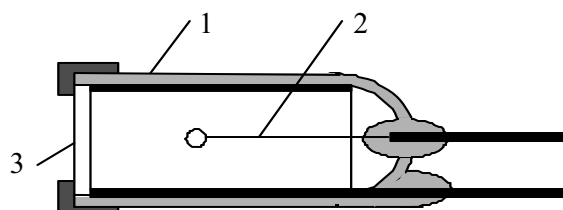


Рис. 3.5.2. Торцовый счетчик

Если два электрода, находящиеся в каком-либо газе, включить в электрическую цепь согласно схеме рис. 3.5.3, то, при слишком большой разности потенциалов и при отсутствии внешних ионизирующих воздействий, тока в цепи практически не будет. Неионизированный газ является изолятором (в нем нет каких-либо частиц, способных переносить электрический заряд от электрода к электроду).

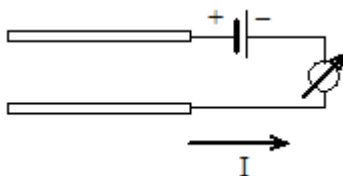


Рис. 3.5.3. Электрическая схема счетчика

Если теперь при помощи источника какого-либо ионизирующего излучения создать ионизацию в газовом промежутке между электродами, то под действием электрического поля положительные ионы будут двигаться к электроду, находящемуся под более низким потенциалом, а электроны и отрицательные ионы – к электроду, находящемуся под более высоким потенциалом. Таким образом, в цепи при наличии ионизации возникает электрический ток, причем перенос зарядов будет осуществляться ионами и электронами, движущимися в электрическом поле. Значение тока зависит от конфигурации электродов и их взаимного расположения, а также от интенсивности излучения и разности потенциалов между электродами.

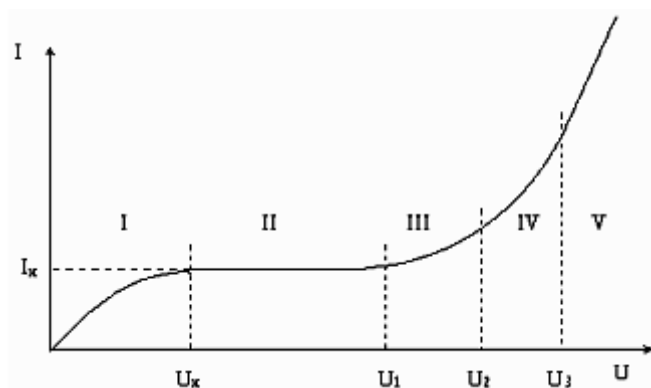


Рис. 3.5.4. Вольт-амперная характеристика детектора с газовым заполнением

Вольт-амперная характеристика детектора с газовым заполнением, снятая при неизменной интенсивности излучения, имеет пять характерных участков (рис. 3.5.4).

При отсутствии разности потенциалов между электродами ионы и электроны движутся хаотически, так что средние числа носителей положительного и отрицательного заряда, проходящих через любую площадку в единицу времени, равны между собой. Таким образом, ток при отсутствии электрического поля равен нулю. В установившемся режиме число пар ионов, образующихся в единицу времени, равно числу пар рекомбинирующих ионов и, следовательно, средняя концентрация ионов остается постоянной.

При появлении электрического поля между электродами движение ионов становится более упорядоченным, то есть возникает регулярная составляющая скорости ионов в направлении соответствующего электрода. При малых значениях напряженности поля лишь небольшая часть ионов достигает электродов и принимает участие в упорядоченном переносе зарядов. Остальные ионы по-прежнему будут рекомбинировать. По мере увеличения напряженности поля, все большая часть ионов принимает участие в образовании тока – ток растет с увеличением напряжения между электродами (участок I вольт-амперной характеристики).

Левую часть участка I, соответствующую малым напряжениям ($U < 0,5 \div 0,6 \cdot U_n$), иногда называют «областью закона Ома», так как в этой области ток линейно зависит от напряжения, и ионизационная камера ведет себя как обычное сопротивление, величина которого тем меньше, чем больше интенсивность излучения.

При некотором значении напряжения на электродах U_n практически все ионы и электроны, образующиеся в результате действия излучения, будут достигать соответствующих электродов – рекомбинация при этом будет практически отсутствовать. Значение тока I_n , соответствующее напряжению U_n , называется током насыщения. При дальнейшем повышении напряжения от U_n до U_1 ток будет оставаться практически постоянным и равным току насыщения I_n , вследствие чего область II вольт-амперной характеристики называется областью токов насыщения. В этой области ток пропорционален интенсивности излучения.

В области III (область пропорциональности) ток при увеличении напряжения возрастает, оставаясь, однако, пропорциональным интенсивности излучения, то есть числу пар ионов, образуемых в единицу времени. В этой области электроны, движущиеся под действием поля, на протяжении свободного пробега приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации нейтральной молекулы, и, таким образом, общее

число пар ионов, участвующих в образовании тока, больше первоначального числа пар ионов (эффект газового усиления).

В области IV также имеет место газовое усиление, однако плотность пространственных зарядов в этой области уже столь велика, что поле зарядов существенно искажает поле электродов и влияет на величину газового усиления, уменьшая ее тем сильнее, чем выше начальная плотность ионов. Вследствие этого в области IV, называемой областью ограниченной пропорциональности, значение тока (при неизменной величине напряжения) уже не будет пропорционально интенсивности излучения – ток растет медленнее, чем интенсивность.

При дальнейшем повышении напряжения достаточно появления одного электрона для того, чтобы произошла вспышка самостоятельного разряда, который, раз появившись, уже не прекращается даже в отсутствии внешнего источника напряжения. Область V, в которой происходит самостоятельный разряд, называется областью Гейгера, а напряжение U_2 – порогом области Гейгера. На участке V газовое усиление возрастает настолько, что собираемый заряд не зависит от первичной ионизации.

Ионизационные камеры работают обычно в области насыщения II, реже – в области I, пропорциональные счетчики – в пропорциональной области III и счетчики Гейгера–Мюллера – в области Гейгера V.

Ионизационные камеры

Ионизационная камера представляет собой детектор излучения с газовым заполнением, в котором не используется эффект газового усиления. Вследствие этого для величины тока, текущего в цепи ионизационной камеры, справедливо неравенство:

$$I \leq N \cdot e = I_n, \quad (1)$$

где N – число пар ионов, образуемых в рабочем объеме ионизационной камеры в единицу времени; e – заряд электрона.

При работе камеры в режиме насыщения неравенство (1) превращается в равенство, так как уменьшение числа пар ионов за счет рекомбинации практически отсутствует, и ток насыщения I_n может быть определен по формуле:

$$I_n = n \frac{\Delta E}{E_u} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A}, \quad (2)$$

где n – число ионизирующих частиц, попадающих в рабочий объем камеры в секунду; ΔE – средние ионизационные потери одной частицы; E_u – средняя энергия, необходимая для образования ионной пары (для воздуха – 34 эВ).

Если же весь свободный пробег частиц происходит в рабочем объеме камеры, в формулу (2) вместо ΔE следует подставить значение начальной энергии частиц. Практическое использование формулы (2) затруднено, так как ΔE зависит от энергетического спектра частиц, который обычно неизвестен или известен неточно, поэтому эта формула используется для ориентировочных расчетов.

Для того, чтобы ионизационный ток был пропорционален интенсивности излучения, необходимо работать в области насыщения, иначе пропорциональность между интенсивностью и током нарушается (рис. 3.5.5, напряжение на камере U_1).

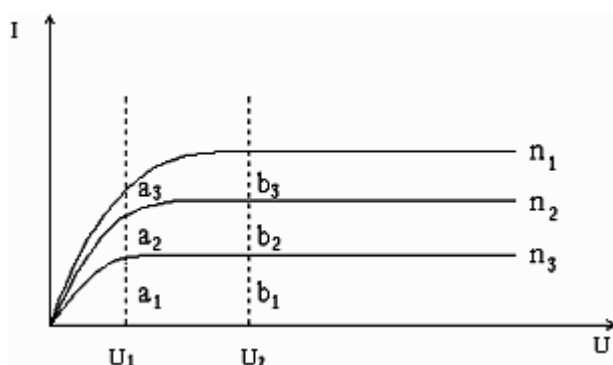


Рис. 3.5.5. Вольт-амперные характеристики ионизационной камеры

Во многих случаях напряжение, соответствующее насыщению, столь велико, что приходится использовать участок I вольт-амперной характеристики, несмотря на связанные с этим неудобства. Процесс уменьшения числа пар ионов вследствие рекомбинации может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha \cdot N^+ \cdot N^-, \quad (3)$$

где N^+ и N^- — концентрация, соответственно, положительных и отрицательных ионов; α — коэффициент рекомбинации.

Таким образом, процесс рекомбинации происходит тем интенсивней, чем выше концентрация ионов. Вследствие этого, при увеличении концентрации ионов (возрастании интенсивности излучения) насыщение будет достигаться при больших значениях напряжения.

По своему характеру рекомбинация может быть либо объемной, либо «колонной». Объемная рекомбинация возможна при более или менее равномерной ионизации газа во всем рабочем объеме камеры, например, при интенсивном воздействии β -частиц. Колонная рекомбинация происходит в «колоннах ионов», образующихся вдоль пути α -частиц или других частиц, создающих большое число пар ионов на единицу пробега.

Плотность ионов в колоннах, образуемых α -частицами в воздухе при атмосферном давлении, столь велика (порядка $3 \cdot 10^{14}$ пар/см), что рекомбинация происходит даже при очень высоких напряженностях, порядка (2000...3000) В/см. Вследствие этого, при работе с α -излучением насыщение практически достигается лишь при пониженных давлениях в камере. Характер зависимости ионизационного тока от давления в камере при ионизации α -частицами показан на рис. 3.5.6.

При очень малых давлениях камера работает в режиме насыщения, однако пробег α -частиц настолько велик, что превышает размеры камеры, и только часть энергии частиц расходуется на ионизацию газа.

По мере повышения давления ток растет сначала линейно, затем скорость роста уменьшается – начинает сказываться рекомбинация в колоннах, при дальнейшем повышении давления рост тока прекращается, а затем ток даже уменьшается из-за интенсивной рекомбинации. Эта зависимость ионизационного тока от давления используется в ионизационных манометрах.

При ионизации газа β -частицами колонная рекомбинация практически не сказывается вплоть до давления порядка сотен атмосфер из-за значительных плотностей ионизации. Вследствие этого, при атмосферном давлении режим насыщения может быть достигнут даже при весьма интенсивных потоках β -частиц, так как влияние объемной рекомбинации сказывается значительно слабее, чем колонной, из-за относительно малой средней концентрации ионов в объеме камеры.

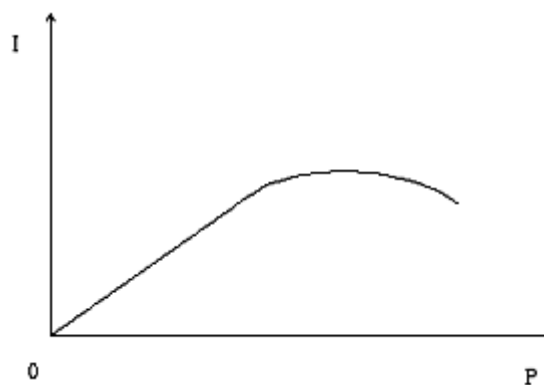


Рис. 3.5.6. Зависимость тока ионизации от давления в камере при ионизации α -частицами

Устройство и схема включения ионизационных камер

Ионизационные токи в камерах, используемых в приборостроении, имеют очень малые значения – примерно ($10^{-9} \dots 10^{-13}$)А. Измерение таких токов производится косвенным образом – по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении R , включаемом последовательно в цепь

ионизационной камеры. Для того, чтобы величина $U_{вых}$ была достаточной для последующего усиления, сопротивление R должно составлять $10^9 \dots 10^{10}$ Ом. Вследствие этого, к изоляции электродов камеры предъявляются жесткие требования: значение сопротивления изоляции должно быть на два-три порядка выше нагрузочного сопротивления.

Ионизационные камеры удобны для регистрации суммарного ионизационного тока, вызванного излучением сравнительно большой интенсивности. Они также используются для регистрации отдельных частиц, обладающих большой ионизационной способностью и не очень большим пробегом в газе (например, α -частиц). Но для регистрации отдельных частиц с малой удельной ионизацией (электроны и др.) или отдельных квантов электромагнитного излучения (рентгеновские и гамма-лучи) применение ионизационной камеры практически невозможно, так как импульсы, возникающие при этом на выходе камеры, чрезвычайно малы. Их амплитуды сравнимы с шумами радиотехнических устройств.

Для увеличения амплитуд импульсов используется газовое усиление ионизационного тока. По виду газового разряда существует два больших класса счетчиков для регистрации ядерных излучений.

1. Пропорциональные счетчики.
2. Счетчики с самостоятельным разрядом.

Чтобы количественно охарактеризовать газовое усиление, пользуются коэффициентом газового усиления γ , представляющим собой отношение числа N пар ионов, участвующих в переносе электричества, к числу n пар первичных ионов:

$$\gamma = \frac{N}{n} > 1. \quad (3)$$

У пропорциональных счетчиков в обычных режимах работы величина коэффициента газового усиления равна нескольким тысячам, у несамогасящегося счетчика с самостоятельным разрядом $\gamma \rightarrow \infty$, так как, начавшись, разряд в этих счетчиках протекает непрерывно.

В настоящее время используются только самогасящиеся счетчики, у которых реальный, условный коэффициент газового усиления равен по порядку величины $10^{10} \dots 10^{11}$, то есть на шесть-семь порядков выше, чем у пропорциональных счетчиков.

Газовое усиление вызывают три фактора:

1. Непосредственно ударная ионизация, производимая первичными электронами на пути к аноду.
2. Фотоэлектронная эмиссия (взаимодействие квантов с веществом катода). При взаимодействии ускоренного электрона с молекулой газа может происходить не ионизация, а возбуждение молекулы, которая за-

тем переходит в основное состояние с испусканием кванта. Энергии возбуждения газов имеют величину порядка нескольких электронвольт, что соответствует энергии квантов ультрафиолетового излучения. Квант, взаимодействуя с веществом катода, может вырвать фотоэлектрон, который, двигаясь к аноду, примет участие в процессе газового усиления.

3. Образование свободных электронов при взаимодействии положительных ионов с катодом (вырывание электронов с катода). Положительный ион, приблизившись к катоду на близкое расстояние – порядка размеров молекулы – создает сильное местное поле и вырывает из катода электрон, с которым рекомбинирует. В результате нейтрализации поля образуется возбужденная молекула, которая может вырвать еще один электрон с катода либо непосредственно, либо путем испускания фотона с последующим фотоэффектом на катоде. Образующиеся свободные электроны участвуют в газовом усилении.

В пропорциональных счетчиках газовое усиление должно достигаться только за счет ударной ионизации первичными электронами. Действие двух последних факторов должно быть сведено к нулю, иначе раз начавшийся разряд будет продолжаться непрерывно даже при отсутствии внешнего источника излучения.

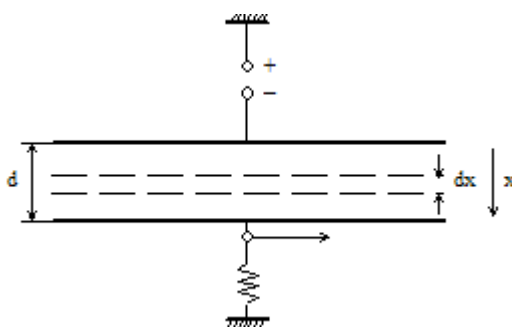


Рис. 3.5.8. Разрядный промежуток, ограниченный двумя плоскопараллельными электродами

Для понимания процесса газового усиления рассмотрим разрядный промежуток, ограниченный двумя плоскопараллельными электродами с размерами, достаточными для обеспечения однородного электрического поля (рис. 3.5.8).

Рассмотрим сначала газовое усиление только за счет действия электронов. Пусть ионизирующая частица создает n_0 пар ионов, из которых αn_0 ионов прошли путь x от высоковольтного электрода и создали n других пар ионов. На участке пути dx число электронов n создадут dn других электронов так, что:

$$dn = \alpha n_0 dx. \quad (4)$$

Интегрируя, получим:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (5)$$

Таким образом, электронная лавина нарастает по экспоненциальному закону. Для тока можно написать следующее выражение:

$$\begin{aligned} i &= i_0 e^{\alpha x}; \\ i_- &= en_- v_-, \end{aligned} \quad (6)$$

где v_- – скорость движения (дрейфа) электронов к аноду.

Рассмотрим теперь протекание разряда с учетом коэффициентов α , β и γ . В этом случае создание вторичных электронов будет обуславливаться как электронами, положительными ионами, так и в результате процессов, происходящих у катода.

Изменение тока с расстоянием от высоковольтного электрода можно выразить дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{di_-}{dx} &= \alpha i_- + \beta i_+, \\ \frac{di_+}{dx} &= -\alpha i_+ + \beta i_+ \end{aligned} \quad (7)$$

Эти уравнения справедливы только в случае установившегося потока электронов и ионов (стационарность разряда). При решении уравнений (7) нужно иметь в виду, что суммарный ток:

$$i = i_- + i_+, \quad (8)$$

А также граничное условие: у катода электронный ток равен:

$$i'_- = i_0 + \gamma(i - i'_+) \quad (9)$$

(предполагается, что первичная ионизация произошла у катода), или:

$$\begin{aligned} i'_- &= i_0 + \gamma(i - i'_-), \\ i'_- &= \frac{i_0 + \gamma i}{1 + \gamma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Решение уравнений (7) имеет вид:

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta)e^{(\alpha - \beta)d}}{(1 + \gamma)\alpha - (\alpha \cdot \gamma + \beta)e^{(\alpha - \beta)d}} \quad (11)$$

Это решение получается при выполнении второго граничного условия: на аноде разрядный ток равен электронному току, то есть $i = i_-$ при $x = d$ (d – расстояние между катодом и анодом).

Коэффициент газового усиления:

$$K = \frac{i}{i_0}, \quad (12)$$

тогда для плоского разрядного промежутка:

$$K = \frac{(\alpha - \beta)e^{(\alpha-\beta)d}}{(1 + \gamma)\alpha - (\alpha\gamma + \beta)e^{(\alpha-\beta)d}}. \quad (13)$$

Пренебрегая процессами у катода, создающими вторичные электроны, то есть полагая $\gamma = 0$, будем иметь:

$$K = \frac{(\alpha - \beta)e^{(\alpha-\beta)d}}{\alpha - \beta e^{(\alpha-\beta)d}}, \quad (14)$$

полагая и $\beta = 0$, имеем:

$$K = e^{\alpha d} \quad (15)$$

Выражение, подобное (5), которое мы получили при учете газового усиления только за счет электронной компоненты.

Типы пропорциональных счетчиков и схема их включения

Пропорциональный счетчик позволяет генерировать каждую ионизирующую частицу, проникшую в его объем. Схема включения счетчика аналогична схеме включения ионизационной камеры (рис. 3.5.9).

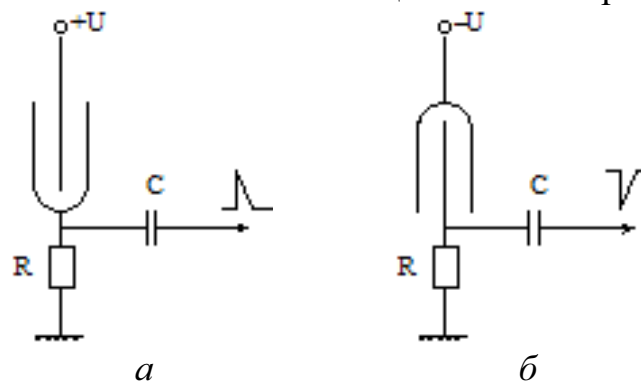


Рис. 3.5.9. Схемы включения пропорционального счетчика

Если счетчик включен по схеме (а), то при регистрации на нагрузке счетчика R возникает кратковременный импульс напряжения положительной полярности с длительностью $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с; при включении по схеме (б) импульс имеет отрицательную полярность. Сопротивление нагрузки R обычно имеет значение порядка 10^6 Ом. Амплитуда импульса зависит от числа пар ионов, образованных ионизирующей частицей в рабочем объеме счетчика, и для сильно ионизирующих частиц (α -частицы) составляет несколько милливольт; амплитуды импульсов, вызванных действием β -частиц, на один-два порядка меньше. Фотоэлектроны и электроны отдачи, выбитые γ -квантами из катода счетчика, дают импульсы значительно меньшей амплитуды. Интенсивность излучения оценивается по средней частоте следования импульсов или по числу импульсов за некоторый промежуток времени.

Счетчики с самостоятельным разрядом

Если повысить напряжение на счетчике до величины, превышающей порог области Гейгера, то разряд в счетчике становится самостоятельным: раз появившись, такой разряд будет продолжаться неопределенно долгое время, если не принимать специальных мер для его прекращения. При рассмотрении процесса газового усиления в пропорциональном счетчике не учитывалось влияние пространственного заряда, образуемого положительными ионами, что было вполне допустимо из-за относительно малой их концентрации.

При работе в режиме самостоятельного разряда (при превышении порога области Гейгера) через счетчик протекает ток значительной величины и концентрация ионов становится настолько большой, что пространственный разряд начинает существенно влиять на процесс разряда. Ударная ионизация и в этом случае происходит в небольшом объеме около анода. Электроны из-за своей высокой подвижности быстро собираются на аноде, а положительные ионы, подвижность которых на несколько порядков ниже, образуют вокруг анода «ауру» положительного пространственного заряда. Вследствие образования этой «ауры» напряженность поля в окрестности анода в конце концов падает до столь малой величины, что ударная ионизация прекращается и разряд обрывается.

По мере рассасывания «ауры» положительных ионов (вследствие продвижения последних к катоду) вновь возникают условия для ударной ионизации и самостоятельного разряда: если в рабочем объеме счетчика появится хотя бы один электрон, то весь цикл разряда возобновится. В современных (самогасящихся) счетчиках основной газ содержит самогасящиеся добавки, которые устраняют причины возможного появления «вторичных» электронов, поэтому при отсутствии внешнего источника ионизации раз образовавшийся разряд вновь уже не возникнет.

Интервал времени, в течение которого из-за наличия пространственного разряда отсутствуют условия для ударной ионизации, называется мертвым временем счетчика. На протяжении «мертвого времени» счетчик вообще не реагирует на ионизирующие частицы.

Интервал времени после «мертвого времени» и до полного восстановления первоначальных характеристик называется временем восстановления. У современных самогасящихся счетчиков «мертвое время» и время восстановления составляют примерно 10^{-4} с.

При измерениях интенсивности излучения могут использоваться два режима работы счетчиков: импульсный и токовый.

В импульсном режиме счетчики включаются, как показано на рис. 3.5.10.

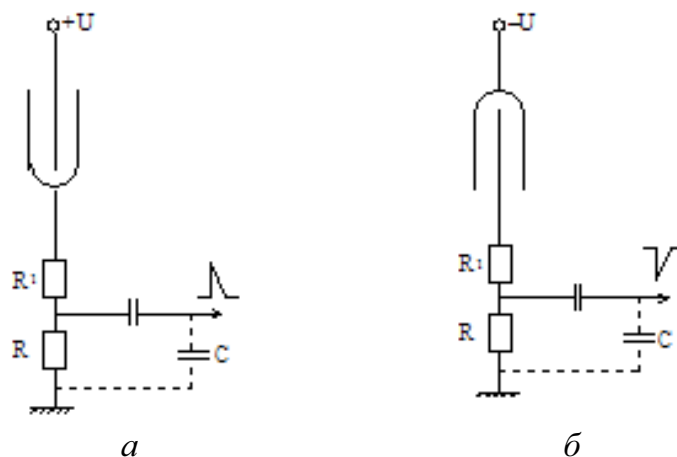


Рис. 3.5.10. Включение счетчиков в импульсном режиме

Эти схемы принципиально не отличаются от схем включения пропорциональных счетчиков. Разделительные сопротивления $R_1 = (1 \dots 1,5)$ МОм устраняют влияние емкости нагрузки C на режим разряда в счетчиках. Сопротивления нагрузки R обычно выбирают равными $3 \dots 5$ МОм; при этом амплитуды выходных импульсов могут достигать нескольких десятков вольт (в зависимости от напряжения на счетчике).

При импульсном режиме работы измерение интенсивности сводится к измерению средней частоты следования импульсов счетчика или к счету числа импульсов за единицу времени. Основной характеристикой газовых счетчиков, существенной для импульсного режима работы, является счетная характеристика – зависимость средней частоты импульсов n (средняя скорость счета) от напряжения питания счетчика при неизменной интенсивности излучения.

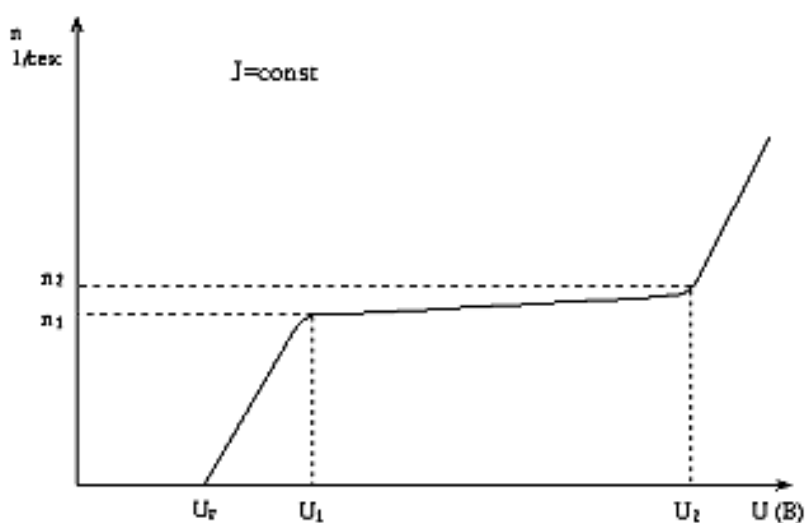


Рис. 3.5.11. Счетная характеристика счетчика с самостоятельным разрядом

При напряжениях на счетчике, меньших U_2 , самостоятельного разряда не происходит, импульсы имеют столь малую амплитуду, что не регистрируются импульсной схемой. Напряжение U_2 , соответствующее порогу области Гейгера, называют напряжением начала отсчета. По мере повышения напряжения выше U_2 скорость счета возрастает сначала быстро, а затем, в интервале напряжений $U_1 - U_2$, весьма медленно. При повышении напряжения выше значения U_2 нормальная работа счетчика нарушается – счетчик «загорается». Область $U_1 - U_2$, в которой скорость счета слабо зависит от напряжения на счетчике, называется плато счетной характеристики счетчика.

При работе счетчика в токовом режиме интенсивность оценивается не по средней скорости счета, а по среднему току, текущему через счетчик. Схемы включения счетчика в токовом режиме приведены на рис. 3.5.12.

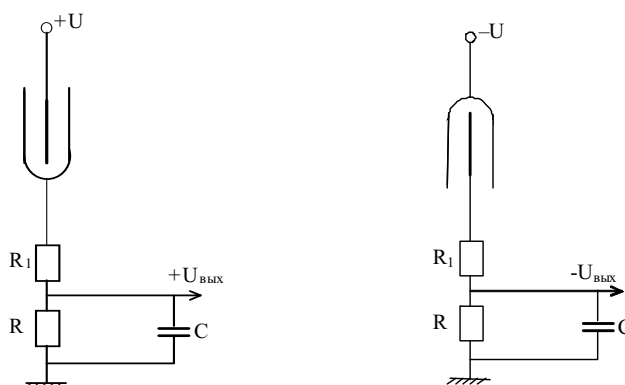


Рис. 3.5.12. Схемы включения счетчика в токовом режиме

При средних скоростях счета значение среднего тока I счетчика определяется выражением

$$I = k \cdot n(U_c - U_0), \quad (16)$$

где n – средняя скорость счета, U_c – напряжение на счетчике; U_0 – напряжение приведения, примерно равное напряжению начала отсчета.

Характер зависимости среднего тока от напряжения на счетчике иллюстрируется токовыми характеристиками, приведенными на рис. 3.5.13.

Нижняя кривая соответствует меньшей скорости счета, а верхняя – большей. Искривление кривых в области напряжений, меньших напряжения левой границы плато, объясняется уменьшением скорости счета.

Значение коэффициента k численно равно количеству электронов (в кулонах), переносимому в одном разряде при разности $U_c - U_0$, равной 1 В и средней скорости счета 1 имп/с. Для галогенных счетчиков различных типов значения k колеблются от $0,6 \cdot 10^{-10}$ до $1,2 \cdot 10^{-10}$.

При анализе схем на рис. 3.5.12 считаем, что интегратор имеет постоянную времени, значительно большую, чем средний период следо-

вания импульсов. Выходное напряжение при этом будет практически постоянным:

$$U_{\text{вых}} = I \cdot R. \quad (17)$$

С учетом очевидного равенства $U_c = U - U_{\text{вых}}$ и зависимости (16) получается выражение, связывающее выходное напряжение с параметрами схемы и средней скоростью счета:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U - U_0}{\frac{1}{k \cdot n} + R}. \quad (18)$$

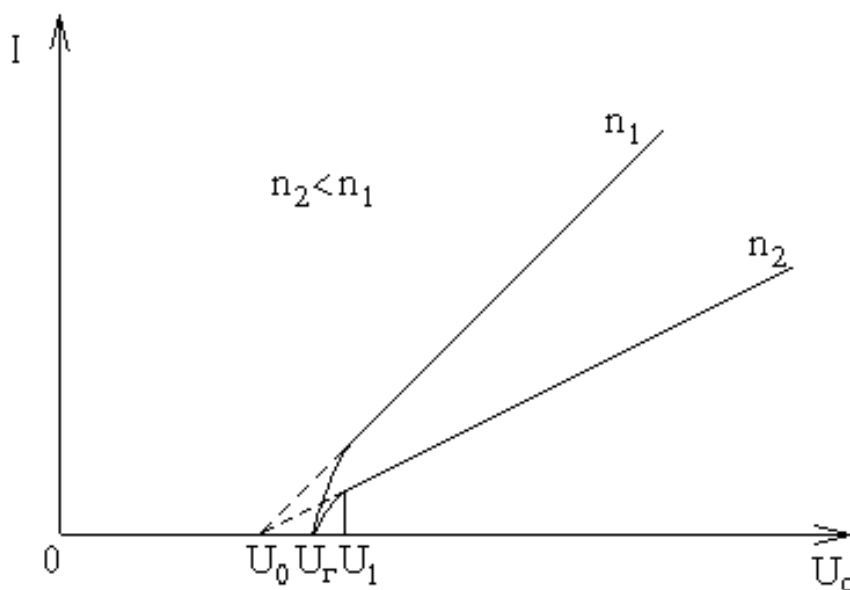


Рис. 3.5.13. Токовые характеристики счетчика

При использовании счетчиков в токовых режимах к стабильности напряжения питания U предъявляются более жесткие требования, чем при использовании импульсных режимов работы.

Искровые камеры

Искровые камеры – дальнейшее развитие газонаполненных детекторов с плоскопараллельными электродами. Электрическое поле в пространстве между плоскими электродами обладает большой однородностью, и если к электродам приложено достаточно высокое напряжение, развитие газового разряда может начаться в любой точке, где возник хотя бы один электрон. В искровой камере развитие разряда происходит вдоль направления внешнего электрического поля. В камерах с большим промежутком между электродами искра следует вдоль траектории регистрируемой частицы.

В процессе развития электронной лавины на пути ее образуется канал значительной протяженности из положительных ионов, собственное

поле которых столь велико, что в канал втягиваются фотоэлектроны. Образуется ионно-электронная плазма, называемая положительным стримером. Сама же лавина, увлекающая за собой ионы, превращается в отрицательный стример. При движении сгустков плазмы к электродам их интенсивность и скорость движения (вследствие дополнительной экранировки внешнего поля собственным) резко возрастают. Возникает хорошо проводящий газовый канал, вдоль которого происходит искровой разряд.

Искровой разряд вспыхивает уже через $10^{-9} \dots 10^{-8}$ с после появления первичного электрона. Поэтому искровая камера обладает высоким быстродействием (в отличие от газонаполненного детектора, где электроны сначала сравнительно долго дрейфуют к области ударной ионизации, расположенной вблизи центральной нити).

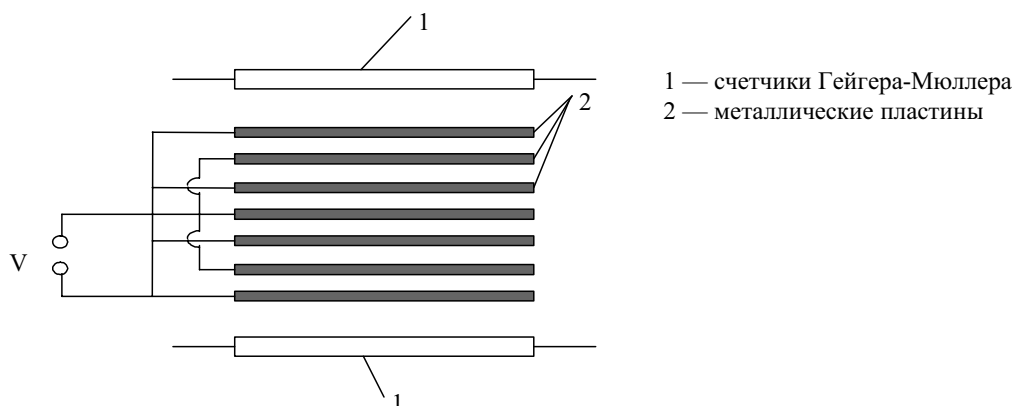


Рис. 3.5.14. Конструкция искровой камеры

Искровая камера представляет собой ряд искровых промежутков, помещенных в общий объем, наполненный рабочим газом. Electroды через один соединены друг с другом и присоединены к генератору высоковольтных импульсов.

Расстояние между электродами равно 10 мм. Камера наполняется газом с давлением 1,1 атм.

Существуют различные виды искровых камер: разрядные, трековые искровые камеры. Принципиального различия между разрядными и искровыми камерами практически нет. Если увеличить расстояние между пластинами, то можно получить как в тех, так и в других разряды, следующие вдоль траектории частицы, если крутизна фронта высоковольтного импульса достаточно велика.

В трековых камерах развитие стимеров обрывается на ранней стадии за счет малой длительности высоковольтного импульса, а следы частиц получаются в виде светящихся колонок — центров, ориентированных по электрическому полю и расположенных вдоль траектории частицы.

Сцинтилляционные детекторы

Метод регистрации заряженных частиц с помощью счета вспышек света, возникающих при попадании этих частиц на экран из сернистого цинка (ZnS), является одним из первых при регистрации ядерных излучений.

Визуальный метод сцинтилляций был использован в основном для регистрации альфа-частиц и протонов с энергией несколько МэВ. Отдельные быстрые электроны регистрировать не удалось, только при попадании на один и тот же кристаллик сернистого цинка одновременно большого числа электронов можно было наблюдать вспышки. Гамма-лучи никаких вспышек на экране не вызывают, создавая лишь общее свечение.

С появлением новых методов регистрации (в связи с появлением фотоэлектронных умножителей) получил развитие сцинтилляционный метод регистрации излучений.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой сочетание сцинтиллятора (фосфора) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В фосфоре происходит преобразование энергии радиоактивного излучения в световую энергию, в ФЭУ световая энергия преобразуется в электрическую.

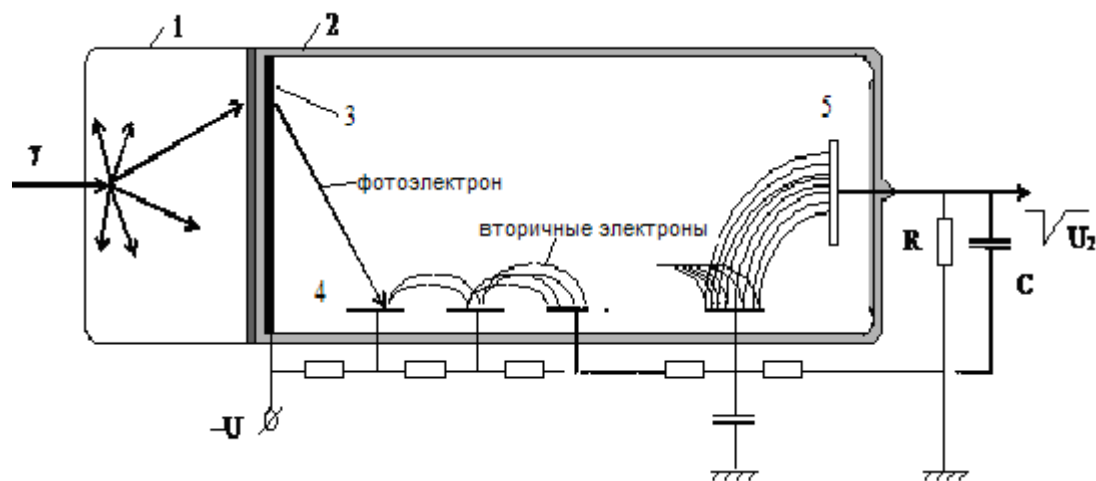


Рис. 3.5.15. Сцинтилляционный счетчик:

1 – сцинтиллятор (фосфор); 2 – ФЭУ; 3 – фотокатод; 4 – динод;
5 – анод ФЭУ

На рис. 3.5.15 схематически изображено устройство сцинтилляционного счетчика. Частица или квант, попадая в фосфор, затрачивает часть своей энергии на ионизацию и возбуждение молекул фосфора. Часть этой энергии излучается возбужденными молекулами в виде све-

товых квантов, испускаемых во всех направлениях. Некоторая часть световых квантов, попавших на фотокатод ФЭУ, вырывает из него фотоэлектроны, которые, ускоряясь в электростатическом поле, попадают на ближайший к фотокатоду динод, находящийся под потенциалом, более высоким, чем у катода. Динод представляет собой металлический электрод, покрытый слоем вещества со значительной вторичной эмиссией. При попадании на такое вещество электронов происходит эмиссия большого числа вторичных электронов, которые, в свою очередь, ускоряясь в электростатическом поле, попадают на следующий динод, находящийся под еще более высоким потенциалом, и т. д.

По мере последовательного прохождения динодов число электронов лавинообразно нарастает (процесс электронного умножения). Электроны, эмитированные последним динодом, собираются на аноде, при этом в анодной цепи протекает кратковременный импульс тока, а на анодной нагрузке возникает кратковременный импульс напряжения отрицательной полярности, величина которого зависит от числа электронов и параметров нагрузки. Измерение интенсивности радиоактивного излучения может производиться теми же методами, что и при использовании газовых счетчиков: импульсным (по средней частоте следования импульсов) или токовым (по среднему току, текущему в анодной цепи ФЭУ).

Для того, чтобы в фосфоре возникла сцинтилляция, необходимо затратить некоторую энергию, получаемую извне.

Заряженные частицы, проходя через фосфор, всегда теряют часть своей энергии или всю энергию. Большая часть энергии, потерянная частицей или квантом при взаимодействии с фосфором, превращается в тепловую энергию колебаний молекул фосфора или в химическую реакцию. Оставшаяся часть энергии превращается в энергию световых квантов, испускаемых фосфором при сцинтилляции. Световое излучение фосфора не является монохроматическим, а занимает некоторую полосу частот.

В качестве фосфоров используют неорганические кристаллы, органические кристаллы, жидкие органические сцинтилляторы, твердые пластмассовые сцинтилляторы, газовые сцинтилляторы. Основными характеристиками сцинтилляторов являются: световой выход, спектральный состав излучения и длительность сцинтилляции.

Неорганические сцинтилляторы представляют собой кристаллы неорганических солей. Механизм возникновения сцинтилляций описывается при помощи зонной теории твердого тела.

Неорганические сцинтилляторы обладают преимуществом по сравнению с газонаполненными счетчиками по эффективности регистрации

гамма-лучей (до десятков процентов), по малой длительности сцинтилляций (10^{-7} с) и по линейной связи амплитуды импульса с величиной энергии, потерянной заряженной частицей.

Органические кристаллические сцинтилляторы обладают достаточно большим световым выходом (антрацен $\sim 4\%$) и малым временем высвечивания ($3 \cdot 10^{-8}$ с у антрацена и $7 \cdot 10^{-9}$ с у стильбена), что позволяет регистрировать излучение большой интенсивности.

Еще меньшим временем высвечивания обладают пластмассовые сцинтилляторы (до $3 \cdot 10^{-9}$ с). Эти сцинтилляторы имеют значительные преимущества по сравнению с неорганическими кристаллическими сцинтилляторами: возможность изготовления сцинтилляторов очень больших размеров; возможность введения в сцинтиллятор смесителей спектра для достижения лучшего согласования его спектра люминесценции со спектральной характеристикой фотокатода; возможность введения в сцинтиллятор веществ, необходимых в специальных экспериментах (например, при исследовании нейтронов); возможность использования в вакууме.

Для сцинтилляционных счетчиков используют исключительно ФЭУ с электростатической фокусировкой электронов. Они имеют полупрозрачные сурьмяно-цезиевые или висмут-серебряно-цезиевые фотокатоды, нанесенные на внутреннюю поверхность плоского переднего торца баллона, образующего входное окно ФЭУ. Все твердые сцинтилляторы должны иметь на одном из торцов выходное окно, которое сочленяется с фотокатодом ФЭУ. В месте сочленения могут быть значительные потери интенсивности света. Для избежания этих потерь между сцинтиллятором и ФЭУ вводятся минеральные или силиконовые масла. Этим создается оптический контакт.

Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы применяются для преобразования и спектрометрии заряженных частиц и гамма-квантов благодаря высокому разрешению по энергии, малому времени нарастания сигнала и малым размерам. Эти детекторы представляют собой твердотельную (кристаллическую) ионизационную камеру, в которой при поглощении ионизирующих излучений образуются носители заряда – электроны и дырки. Полупроводниковые детекторы выполнены обычно на основе р-п-перехода в кристаллах кремния или германия.

В реальных кристаллах всегда присутствуют некие центры, которые с большой вероятностью захватывают либо электроны, либо дырки, и тогда свободными остаются или положительные, или отрицательные носители. При отсутствии каких-либо внешних воздействий проводи-

мость кристалла полностью обусловлена носителями, возникающими за счет тепловых колебаний кристаллической решетки. Число свободных носителей зависит от температуры образца:

$$n = Ae^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (19)$$

где n – число носителей в единице объема кристалла; A – коэффициент, характерный для данного кристалла (зависит от температуры, $A \sim T^{3/2}$); ΔE – энергия диссоциации; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Для проводимости кристалла имеет место выражение:

$$\sigma = nev, \quad (20)$$

где e – заряд электрона; v – скорость дрейфа носителя под действием приложенного поля. Проводимость связана с подвижностью u носителя:

$$v = uE, \quad (21)$$

где E – напряженность поля.

Проводимость кристалла германия резко повышается в присутствии даже очень малых количеств примеси другого химического элемента. Известно, что элементы пятой группы периодической системы Менделеева сообщают германию электронную проводимость, а элементы третьей группы – дырочную. Атомы примеси, создающие в полупроводнике электронную проводимость, носят название доноров. Примесные атомы, обуславливающие дырочную проводимость, называются акцепторами.

Эффективно используются счетчики, сделанные на основе p – n –перехода в кристаллах кремния или германия.

Если в кристалл n –кремния с одного конца введена акцепторная примесь, то на этом конце появится дырочная проводимость. В результате взаимного проникновения электронов из n –области в p –область и дырок из p –области в n –область на границе раздела областей образуются слои положительного и отрицательного зарядов. Между этими слоями появится «контактная» разность потенциалов, препятствующая дальнейшему проникновению свободных носителей заряда. Образуется p – n –переход, для которого характерным является очень малая концентрация свободных носителей. Возможны как симметричные, так и несимметричные p – n –переходы.

Несимметричный переход может образоваться между областями с сильно отличающимися концентрациями носителей заряда. Пусть, например, $p \gg n$, где p – концентрация дырок в p –области и n – концентрация электронов в n –области. В этом случае концентрация акцепторных ионов N_a в p –области будет много больше концентрации донорных ионов N_d в n –области, а так как при образовании перехода должны уча-

ствовать одинаковые количества ионов с той и другой стороны, то естественно, что ширина слоя донорных ионов должна быть много больше ширины слоя акцепторных ионов, т. е. образуется несимметричный p - n -переход ($l_p / l_n = n / p$). Напряженность E электрического поля перехода будет иметь максимальное значение на границе раздела слоев и убывать к краям перехода.

В n -кремнии всегда будут присутствовать свободные электроны и в значительно меньших количествах дырки. Здесь электроны n_n являются основными носителями, а дырки p_n – неосновными. В p -кремнии, наоборот, дырки p_p являются основными носителями, а электроны n_p – неосновными.

Электрическое поле, возникшее в переходе, будет препятствовать проникновению неосновных носителей. Последнее обстоятельство не портит основные свойства перехода, так как концентрации неосновных носителей обычно очень малы по сравнению с концентрациями основных носителей.

Таким образом, путем введения в полупроводниковый кристалл различных примесей можно создать донорный слой, обладающий большим удельным сопротивлением p - n -переход.

Толщина перехода l_0 будет зависеть от концентраций основных носителей (n и p) и может быть выражена в виде:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon v_0}{e} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}, \quad (22)$$

где v_0 – разность потенциалов на переходе; ε – диэлектрический потенциал; e – элементарный заряд; N_d – концентрация доноров; N_a – концентрация акцепторов.

Для несимметричного перехода, например, при $N_a \gg N_d$,

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon v_0}{eN_d}}. \quad (23)$$

Так как обычно концентрации доноров и электронов в n -полупроводнике равны друг другу ($N_d = n_n$), то можно выразить толщину перехода l_0 через подвижность носителей и удельное сопротивление более высокоомной части кристалла (в данном случае n -кремния), используя следующие формулы:

$$\sigma_n = \frac{1}{\rho_n} = enu_n, \quad \sigma_p = \frac{1}{\rho_p} = epu_p, \quad (24)$$

где σ_n и σ_p – удельные проводимости n - и p -областей; ρ_n и ρ_p – удельные сопротивления n - и p -областей; u_n и u_p – подвижности электронов и дырок.

Таким образом, $l_0 = \sqrt{2\varepsilon v_0 u_n \rho_n}$.

Численное значение толщины перехода обычно находится в пределах от нескольких десятых долей микрометра до микрометра, а разность потенциалов на нем равна нескольким десятым вольт.

Образование импульса. Если заряженная частица попадает в область p - n -перехода и расходует всю свою энергию на создание в ней пар электронов и дырок, то число возникших пар будет больше, чем число ионов, образовавшихся в газе при прохождении той же частицы. Средняя энергия, затрачиваемая на создание одной пары электрон-дырка, равна в кремнии 3,53 эВ, а в германии – 2,94 эВ (для сравнения напомним, что в воздухе для создания одной пары ионов расходуется средняя энергия в 35 эВ). Так, например, альфа-частица с энергией 5,3 МэВ создает в германии $\sim 1,5 \cdot 10^6$ пар электрон-дырка.

Образовавшиеся в области перехода неравновесные носители заряда будут под действием поля дрейфовать к соответствующим электродам. Так как в счетчике с p - n -переходом практически все поле сосредоточено именно в области p - n -перехода, то время собирания зарядов будет равно времени, необходимому для прохождения только перехода. Это время может быть вычислено по формуле

$$t = \frac{l}{uE}, \quad (25)$$

где E – напряженность поля в области перехода.

Обычно толщина перехода в кремниевых и германиевых счетчиках составляет десятки или сотни микрометров (конечно, при наличии приложенного поля). Подвижность электронов в кремнии равна $1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Напряженность электрического поля в области перехода доходит до больших величин. Можно легко получить $E = 10^3 \text{ В/см}$. При этих условиях время прохождения перехода носителями может составлять $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ с}$. Оно и будет определять время нарастания импульса.

3.5.4. Описание установки и методика эксперимента

Для демонстрации работы детекторов излучения используется лабораторная установка, где в качестве источника излучения применяется бетатрон с выведенным пучком электронов. На рис. 3.5.16 приведена блок-схема установки. Установка работает следующим образом. Ток ионизационной камеры 5 или другого детектора имеет порядок $10^{-10} \dots 10^{-15} \text{ А}$. Измерение такого тока выполняют не непосредственно, а по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении R , включаемом последовательно в цепь ионизационной камеры или на нагрузке ФЭУ в сцинтилляционном детекторе. Далее измерения проводят с помощью усилителя

постоянного тока 3 либо счетным методом через блок счета импульсов. Результаты измерений считывают с регистрирующего прибора 4.

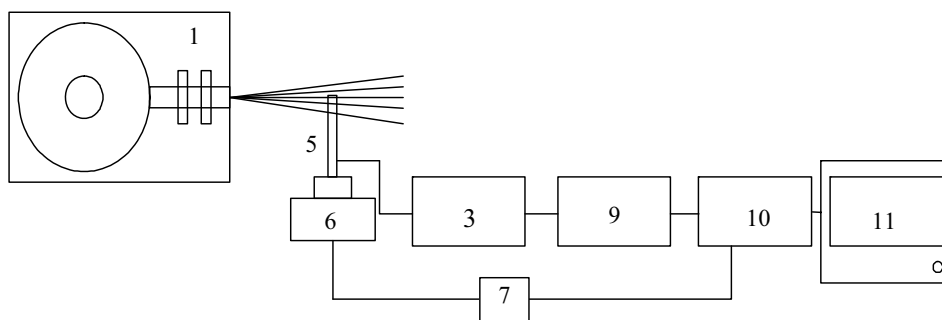


Рис. 3.5.16. Экспериментальная установка

В качестве контрольного прибора в установке используется дозиметр с ионизационной камерой наперсткового типа. С помощью этого дозиметра определяется мощность дозы на данный момент времени.

Камера 5 устанавливается на подвижной платформе 6, движущейся по траектории, поперечной пучку излучения. Результаты измерений преобразуются в АЦП 9 в цифровую форму и запоминаются в ЭВМ 10. С помощью ЭВМ и цифроаналогового преобразователя управляют движением камеры 5. Камера 5 может быть заменена другим детектором, например, сцинтилляционным.

Работа с дозиметром

Перед включением нажать кнопку «Ноль» выключателя «Коэффициент F2».

Нажать выключатель «Сеть». По истечении 2 мин дозиметр готов к проведению измерения. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «Ноль» вход дозиметра замкнут накоротко и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

Ионизационная камера закрепляется на штативе и фокусируется непосредственно на месте измерения.

Прутковая (наперстковая) камера является воздухоэквивалентной ионизационной камерой, предназначенной для измерения дозы и мощности дозы. Чувствительный ее объем равен 50 мм^3 . Материал электродов – воздухоэквивалентная смесь. Чувствительность при нормальных условиях – $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А} \cdot \text{мин}/\text{Р} \pm 3 \%$. Диапазон измерения мощности дозы 0–333, 1000, 3330, 10000, 33300 Р/мин. Конструктивно камера выполнена в виде прутка длиной 25 см, на который натянут пластмассовый шланг.

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облученной длины кабеля и может составлять при облученной длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем простого умножения трех коэффициентов и значения показывающей шкалы:

$$F_k \times F1 \times F2 \times F_{шк} = P \text{ [Р/мин]}.$$

F_k – коэффициент камеры, для прутковой (наперстковой) = 3,33.

$F1$ – переключатель «коэффициент F1».

$F2$ – кнопочный выключатель «коэффициент F2».

$F_{шк}$ – показания стрелочного прибора VA-J-18.

Для прутковой камеры предельное значение диапазона измерения 3000 Р/мин или 3000 Р.

3.5.5. Порядок выполнения работы

Выполнение работы проводится в три этапа:

- демонстрация работы ионизационной камеры, сцинтилляционного счетчика;
- измерение распределения мощности дозы электронного излучения бетатрона с помощью наперстковой ионизационной камеры;
- измерение вольт-амперной характеристики ионизационной камеры.

Этап 1. Работа ионизационной камеры и сцинтилляционного детектора

1. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию E_1 ускорения электронов.

2. Установить прутковую ионизационную камеру в предполагаемый центр пучка излучения.

3. Установить испытуемую ионизационную камеру в предполагаемый центр пучка излучения.

4. Включить необходимую аппаратуру для прогрева.

5. Включить последовательно питание электромагнита бетатрона и «Ток инъекции».

6. Произвести измерение мощности дозы в пучке излучения.

7. Выключить последовательно «Ток инъекции», питание электромагнита.

8. Заменить ионизационную камеру на сцинтилляционный детектор.

9. Включить высоковольтный блок питания сцинтилляционного детектора.

10. Включить последовательно питание электромагнита бетатрона и «Ток инъекции».

11. Произвести измерение мощности дозы излучения по дозиметру и величину импульса сцинтилляционного детектора.

12. Выключить последовательно «Ток инъекции», питание электромагнита.

13. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию $E_2 - E_5$ ускорения электронов.

14. Повторить пп. 2–12 при энергии излучения $E_2 - E_5$.

15. Построить зависимости от энергии для камеры и для сцинтилляционного детектора.

16. Сопоставить результаты измерения мощности дозы в пучке излучения с помощью дозиметра, испытываемой ионизационной камеры и сцинтилляционного детектора.

Этап 2. Измерение распределения мощности дозы электронного излучения бетатрона

1. Подготовить аппаратуру для измерения пространственного распределения электронов в среде согласно схеме рис. 3.5.16.

2. Измерить расстояние между наперстковой ионизационной камерой и окном выхода электронов излучения.

3. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию E ускорения электронов.

4. Включить тумблер «Сеть» пульта управления.

5. Убедиться по газоразрядному индикатору пульта управления, что значение напряжения соответствует 220 В.

6. Через 5 мин включить питание электромагнита и затем «Ток инъекции».

7. Установить с помощью ЭВМ, запустив программу move.exe и устройства протяжки, платформу в среднее положение.

8. С помощью регулировки ручек на пульте управления «Мощность дозы», «Грубо», «Точно», «Контрактор» и установки соответствующих токов питания квадрупольных линз добиться максимального показания мощности дозы на дозиметре.

9. Выбрать в меню программы п. 4 и произвести измерение радиального распределения излучения бетатрона.

10. По запросу программы сохранить полученные данные на диске, присвоив файлу имя.

11. Выключить последовательно «Ток инъекции» и питание бетатрона.

Этап 3. Измерение вольт-амперной характеристики ионизационной камеры

1. Подготовить аппаратуру для измерения вольт-амперной характеристики ионизационной камеры согласно рис. 3.5.16.
2. Установить на пульте управления бетатрона заданную энергию E_1 ускорения электронов.
3. Включить тумблер «Сеть» пульта управления.
4. Убедиться по газоразрядному индикатору пульта управления, что значение напряжения соответствует 220 В.
5. Через 5 минут включить питание электромагнита и затем «Ток инъекции».
6. С помощью ручек управления на пульте «Мощность дозы», «Грубо», «Точно», «Контрактор», а также установки соответствующих токов питания квадрупольных линз добиться стабильного и максимального показания мощности дозы на дозиметре.
7. Установить минимальное значение напряжения на ионизационной камере 5 и, начиная с этого значения, измерить величину ионизационного тока на камере, увеличивая напряжение на ней с шагом 50 В или 100 В до момента, когда значение тока начнет увеличиваться после участка тока насыщения.
8. После записи последних измерений выключить напряжение на ионизационной камере.
9. Выключить последовательно «Ток инъекции», «Питание электромагнита» и «Сеть».
10. Выключить всю аппаратуру.

3.5.6. Обработка результатов измерений

1. С помощью графической программы GRAPHER построить график зависимости $P = f(x)$.
2. По графику зависимости рассчитать угол рассеяния пучка излучения.
3. Ввести данные измерения вольт-амперной характеристики ионизационной камеры для получения файла данных и по программе GRAPHER построить график зависимости $V = f(A)$: вольт-амперную характеристику.
4. Объяснить полученные данные письменно в выводах работы.

3.5.7. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Введение.
3. Цель работы.
4. Схему измерений.
5. Таблицы с экспериментальными данными.
6. Графическую зависимость по экспериментальным данным.
7. Выводы.

3.5.8. Дополнительные вопросы

1. Почему толщина стенок ионизационной камеры должна быть больше максимального пробега электронов?
2. Чем отличается импульсная ионизационная камера от других ионизационных камер (физический смысл)?
3. Можно ли ионизационной камерой измерить радиоактивность газа?
4. Какое основное условие необходимо выполнить при абсолютных измерениях активности источников с помощью ионизационной камеры?
5. Чем объяснить необходимость знания вольт-амперной характеристики ионизационной камеры?
6. Каким способом можно повысить эффективность собирания света на фотокатод ФЭУ в сцинтилляционном детекторе?
7. Какие факторы вызывают газовое усиление в счетчиках, наполняемых газом?

Список использованных источников

1. Тишкин П.А. Экспериментальные методы ядерной физики. Ч. 1. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. – 232 с.
2. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1987. – 392 с.
3. Таточенко Л.К. Радиоактивные изотопы в приборостроении. – М.: Атомиздат, 1960. – 361 с.
4. Радиационная дозиметрия: Электронные лучи с энергией от 1 до 50 МэВ: доклад 35 МКДЕ. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

ГЛАВА 4. СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ

4.1. Определение энергии гамма-излучения с помощью сцинтилляционного спектрометра

Сцинтилляционный метод является одним из наиболее распространенных способов регистрации и спектрометрии ядерных излучений. Сцинтилляционные детекторы широко используются в ядерной физике для измерения спектров излучений, возникающих при распаде радиоактивных нуклидов и в ядерных реакциях, для измерения времен жизни возбужденных состояний атомных ядер, для исследования космического излучения и для решения многих других задач. Сцинтилляционная техника применяется в сложных опытах по изучению нейтрино. Широкое применение сцинтилляционные детекторы нашли и в других областях науки: геологии (поиски полезных ископаемых, определение возраста пород, активационный анализ), изучении свойств твердого тела, биологии, медицине. Сцинтилляционный метод нашел широкое применение и в технике: гамма-дефектоскопия, различного вида бесконтактные толщиномеры и плотномеры, сигнальные устройства и т. д.

Широкое использование сцинтилляционных детекторов объясняется такими их свойствами, как:

- высокая эффективность регистрации (сцинтилляционный счетчик с кристаллом NaJ (Tl) регистрирует 20–40 % от числа падающих на него гамма-квантов с энергией 660 кэВ);
- высокая временная разрешающая способность ($10^{-7} \dots 10^{-9}$ с);
- способность измерять энергии частиц и гамма-квантов (с погрешностью до нескольких процентов);
- относительная простота аппаратуры.

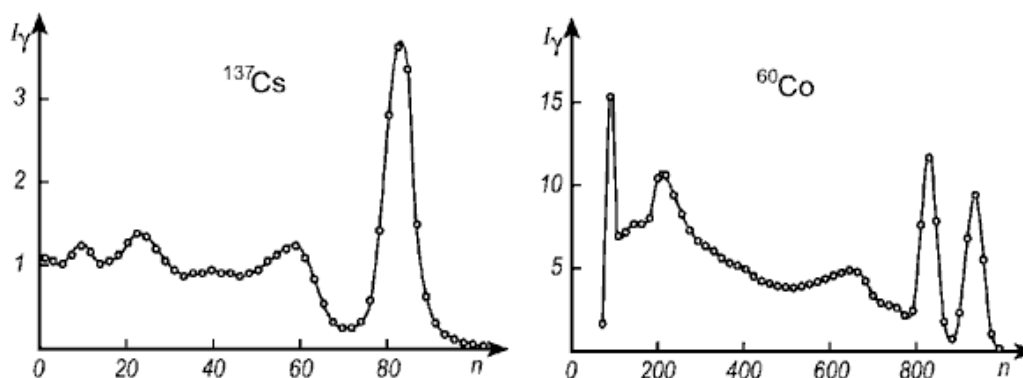


Рис. 4.1.1. Спектры гамма-лучей Cs^{137} ($E_{\gamma} = 661$ кэВ) и Co^{60} ($E_{1\gamma} = 1173$ кэВ) и ($E_{2\gamma} = 1332$ кэВ), измеренные кристаллами NaJ (Tl)

4.1.1. Многоканальный амплитудный анализатор

Анализатор представляет собой устройство, в котором распределение сигналов по амплитудам измеряется сортировкой сигналов параллельно по всем каналам, в зависимости от значения амплитуды. Число импульсов, зарегистрированных в каналах, фиксируется многоканальным регистратором. В анализаторе с линейной измерительной характеристикой при числе каналов m весь диапазон измеряемых амплитуд разделен на m равных интервалов, границы которых соответствуют порогам A^{\min} , $A^{\min} + \Delta A$, $A^{\min} + 2\Delta A$, ..., $A^{\max} - \Delta A$, A^{\max} . Число каналов анализатора, рассчитанного на работу со сцинтилляционными детекторами, равно 50–100; для использования с полупроводниковыми детекторами необходимо устройство с числом каналов 500–2000.

В многоканальном амплитудном анализаторе амплитуда каждого входящего сигнала сравнивается со значениями градуированной шкалы амплитуд и по номеру интервала, куда попадает сигнал, определяется соответствующий номер канала регистратора. Следовательно, аналоговая измеряемая величина – амплитуда преобразуется в дискретную величину, т. е. производится процесс квантования; ширина канала ΔA – интервал квантования. Определить номер зоны (или канала), в которую попадает входной сигнал, по значению его амплитуды, можно несколькими способами. Согласно этому выполняются многоканальные амплитудные анализаторы разных видов. При этом используется как прямое измерение несколькими мерами, задающими границы интервалов (каналов), так и последовательное измерение значения амплитуды единой мерой.

Анализаторы используют несколько дискриминаторов. Прямое измерение амплитуды входящего сигнала осуществляет устройство из $m + 1$ пороговых каскадов (ПК) с уровнями срабатывания A^{\min} , $A^{\min} + \Delta A$... и т. д. и m -схем антисовпадений (АС), связанных со смежными пороговыми каскадами. Каждая схема антисовпадений отбирает случаи, когда при срабатывании порогового каскада с уровнем $A_i + \Delta A$ схема не срабатывает, т. е. случай попадания амплитуды сигнала в интервал $A_i \div A_i + \Delta A$. Если амплитуда входного сигнала лежит в пределах $A_{\min} - A_{\max}$, то срабатывает одна из схем антисовпадений, вырабатывая сигнал добавления единицы в соответствующий канал регистратора (C_r).

На рис. 4.1.2 приведена структурная схема такого устройства. По существу такой многоканальный анализатор содержит m дифференциальных дискриминаторов, у которых каскад дискриминации верхнего уровня одного канала служит одновременно каскадом дискриминации нижнего уровня следующего канала и пороги дискриминации последовательно сдвинуты на ширину канала.

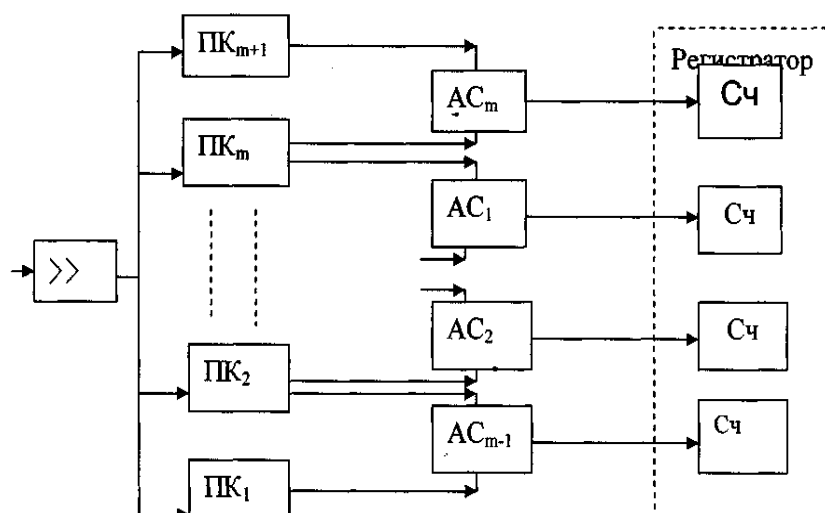


Рис. 4.1.2. Структурная схема многоканального анализатора с m дифференциальными дискриминаторами

Наличие m мер, которые определяют границы каждого канала и одновременно (параллельно) сравниваются с измеряемым сигналом, позволяет получить высокое быстродействие. Мертвое время такого анализатора равно мертвому времени одноканального анализатора и может быть уменьшено до долей микросекунды.

Однако использование нескольких элементов и каскадов, задающих параметр измерений, приводит к серьезным недостаткам:

- громоздкость и большое число элементов; так, если пороговый каскад и схема антисовпадений содержат по два транзистора, общее число триодов в дискриминаторах превосходит $4m$, т.е. 400 для 100-канального анализатора;
- значительная нестабильность ширины канала и ее непостоянство вдоль шкалы (большая дифференциальная нелинейность); для поддержания равной ширины каналов дискриминаторов необходимо сохранять одинаковыми используемые m мер, что требует дальнейшего увеличения количества оборудования.

Поэтому подобные анализаторы находят сейчас ограниченное применение. Такой принцип построения может оказаться оправданным при относительно малом числе каналов (менее 10–15) и при необходимости достижения высокого быстродействия (менее микросекунды).

Анализаторы используют единое измерительное устройство. Упрощение схемы и повышение таких параметров анализатора, как стабильность и однородность каналов, достигается последовательным измерением значения амплитуды единой для всех каналов мерой. Ширина каналов задается одним, общим для всего устройства элементом. Определение номера канала, соответствующего амплитуде входного сигнала,

производится последовательным суммированием нескольких эталонных величин, равных ширине канала, до тех пор, пока не будет достигнут уровень амплитуды измеряемого сигнала. Таким образом, измерения носят последовательный характер, и номер канала определяется числом интервалов квантования, соответствующих измеряемой величине, т. е. представляется в последовательном коде.

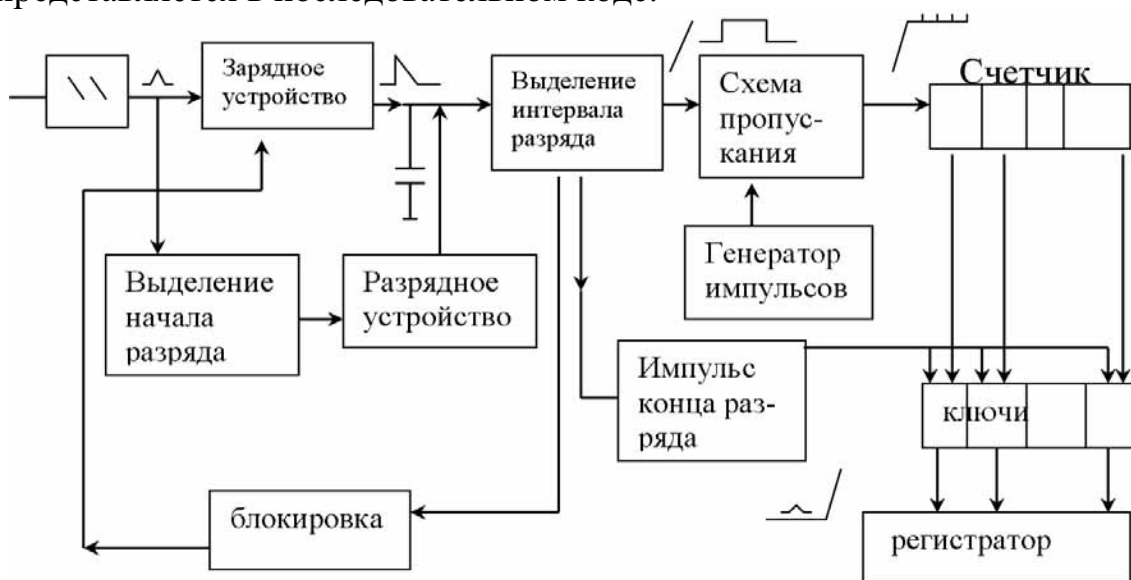


Рис. 4.1.3. Структурная схема многоканального анализатора с амплитудно-время-цифровым преобразованием

4.1.2. Дискриминаторы

Амплитуда выходного сигнала некоторых детекторов (сцинтилляционный или пропорциональный счетчик, ионизационная камера) в большинстве случаев линейно связана с энергией регистрируемой ядерной частицы. Поэтому амплитудный спектр импульсов напряжения от таких детекторов подобен спектру исследуемых ядерных частиц. Исследование амплитудного спектра импульсов напряжения производят с помощью устройств, называемых дискриминаторами.

4.1.3. Интегральный дискриминатор

Простейший метод амплитудного анализа импульсов – отделение импульсов исследуемого излучения от импульсов меньших амплитуд (шумы или более мягкое излучение). Для этого применяются дискриминаторы, импульс на выходе которых появляется только тогда, когда амплитуда импульса на входе усилителя превышает некоторый предел – порог дискриминации $U_{пор}$.

Затем эта величина ($U_{пор}$) меняется, и эксперимент повторяется многократно.

Кривая зависимости скорости счета от порога дискриминации дает возможность получить интегральный спектр исследуемого излучения

Простейшим устройством, позволяющим получить интегральный спектр, является дискриминатор на кристаллическом диоде (рис. 4.1.4). На вход системы поступает серия импульсов. На катод диода подается положительный потенциал $U_{\text{пор}}$ через сопротивление R_1 . Сигнал на выходе схемы будет отсутствовать, пока амплитуда импульса на входе не превысит значение $U_{\text{пор}}$.

Если амплитуда входного сигнала превышает величину порогового смещения, то диод открывается, а на выходе появляется импульс, соответствующий импульсу на входе. Изменение порога дискриминации производится с помощью сопротивления.

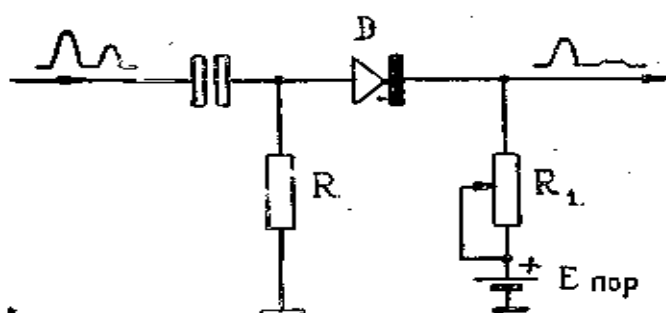


Рис. 4.1.4. Дискриминатор на кристаллическом диоде

Однако при этом нельзя получить информацию о числе импульсов каждой амплитуды; такую возможность дает дифференциальный спектр, который может быть получен из интегрального спектра путем численного дифференцирования последнего. Но подобный метод получения дифференциального спектра требует длительных расчетов и повышенной стабильности аппаратуры. Поэтому он обычно не применяется. Для непосредственного получения дифференциального спектра разработаны специальные приборы – дифференциальные амплитудные анализаторы. Одноканальный амплитудный анализатор регистрирует все импульсы, амплитуда которых превышает некоторый нижний порог $U_{\text{пор.н}}$ и не достигает верхнего порога $U_{\text{пор.в}}$ (рис. 4.1.5). Разность $U_{\text{пор.н}} - U_{\text{пор.в}} = \Delta U$ называется шириной канала амплитудного анализатора. При снятии дифференциального спектра меняется положение $U_{\text{пор.н}}$ и $U_{\text{пор.в}}$ так, чтобы ширина канала ΔU оставалась неизменной. Блок-схема одноканального амплитудного анализатора представлена на рис. 4.1.5, а. Дискриминаторы верхнего и нижнего уровней являются устройствами, аналогичными интегральному дискриминатору, описанному ранее, причем порог срабатывания дискриминатора верхнего уровня выше порога срабатывания дискриминатора нижнего уровня.

Для регистрации импульсов, амплитуда которых заключена в пределах $U_{\text{пор.н}} + \Delta U$ импульсы с входов и выходов обоих дискриминаторов поступают на схему антисовпадений. Сигнал на выходе схемы антисовпадений появляется только в том случае, когда срабатывает дискриминатор нижнего уровня, а дискриминатор верхнего уровня не срабатывает.

Простейшая схема, отвечающая таким требованиям, изображена на рис. 4.1.5, б. До поступления импульсов на входы устройства диод D_1 , закрыт, поскольку напряжение на его катоде больше напряжения в точке А. При одновременном поступлении сигнала на входы 1 и 2 сигнал на выходе устройства не появляется, так как диод D_1 закрывается, а диод D_2 открывается. Импульс напряжения на выходе появляется только в том случае, если на диод D_2 не подается отрицательный сигнал.

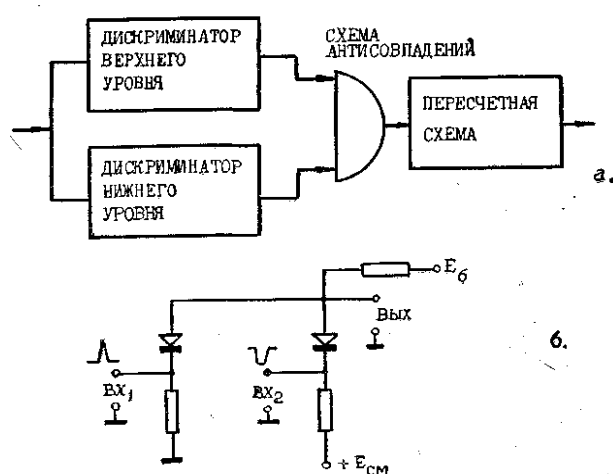


Рис. 4.1.5. Одноканальный амплитудный анализатор

4.1.4. Принцип работы многоканального амплитудного анализатора

Во время измерений одноканальным анализатором регистрируется лишь небольшая часть импульсов, амплитуда которых лежит в пределах канала ($U_{\text{пор.н}} < A < U_{\text{пор.в}}$); все остальные импульсы теряются. Этого недостатка лишены многоканальные амплитудные анализаторы, в которых регистрация возможна в любом из N каналов с шириной U_k . Обычно каналы устанавливаются так, что их нижние пороги соответственно равны $0, U_k, 2U_k, 3U_k$ и т. д. Число каналов современного анализатора доходит до нескольких тысяч.

В таких анализаторах, как правило, используют косвенный метод измерения амплитуды, основанный на преобразовании амплитуды импульса в интервал времени ($A \rightarrow t$) с последующим измерением этого интервала с большей точностью. Интервал заполняется импульсами определенной частоты; число этих импульсов определяет длительность интервала, а, следовательно, и амплитуду измеряемого импульса.

Наибольшее распространение получил способ преобразования амплитуды в длительность с использованием конденсатора памяти C_n (рис. 4.1.6).

Конденсатор C_n заряжается до амплитудного значения A , затем производится линейный разряд этого конденсатора постоянным током I (пунктирная наклонная прямая на рис. 4.1.6).

Конденсатор памяти приобретает заряд $Q = C_n A$. Этот же заряд отбирается в течение времени разрядной схемой: $Q = It$. Следовательно:

$$t = A \frac{C}{I},$$

т. е. время разряда накопительного конденсатора пропорционально амплитуде измеряемого импульса. За напряжением на конденсаторе следит дискриминирующая схема с малым порогом срабатывания. Длительность импульса с дискриминатора примерно равна времени линейного разряда емкости C_n и, следовательно, пропорциональна амплитуде измеряемого импульса A ; в дальнейшем этот импульс используется для управления времязадающим генератором.

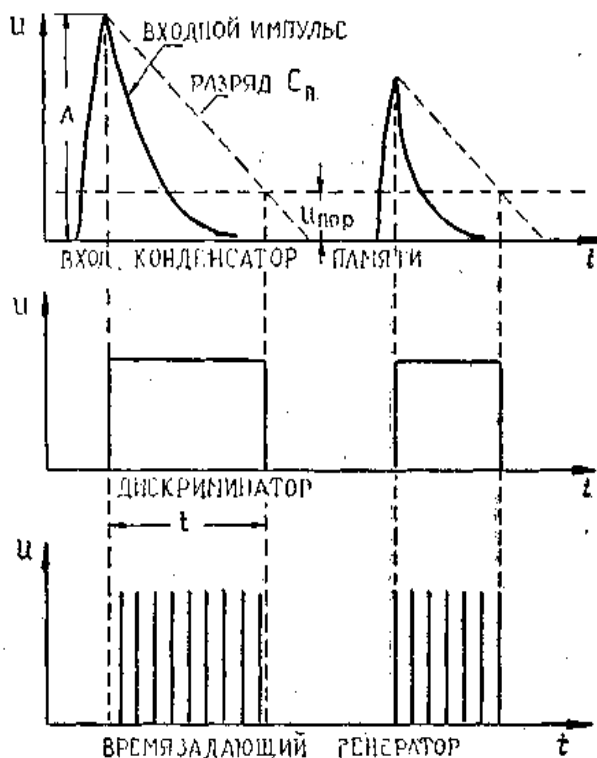


Рис. 4.1.6. Преобразование амплитуды в длительность с использованием конденсатора памяти C_n

Число импульсов времязадающего генератора, таким образом, является кодом амплитуды.

Необходимым элементом анализатора является запоминающее устройство. По коду амплитуды в запоминающем устройстве отыскивается

адрес – номер канала и в этот канал добавляется (+1), т. е. производится регистрация нового события в канале. Функциональная блок-схема многоканального анализатора приводится на рис. 4.1.7.

В современных анализаторах применяются запоминающие устройства, заимствованные из техники вычислительных машин, выполненные на ферритовых устройствах. Элементом памяти таких устройств являются магнитные тороидальные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса – ферриты; используется их способность принимать два различных магнитных состояния, соответствующих остаточной индукции $+B_r$ и $-B_r$. Состоянию $+B_r$ приписывается, например, значение двоичного числа «1», в то время как состоянию $-B_r$ – значение двоичного числа «0». Для записи «1» или «0» в обмотку феррита посылаются токи $+I$ или $-I$, соответствующие магнитной напряженности $\pm H_m$. Запоминаемое ферритом («0» или «1») может быть прочитано. Для этого достаточно в обмотку направить, например, отрицательный импульс тока $-I$. Если в феррите записан «0», т. е. феррит находится в состоянии $-B_r$, то при протекании тока $-I$ изменение индукции ($B_m - +B_r$) будет незначительным и на выходной обмотке появится импульс небольшой амплитуды (рис. 4.1.8). При считывании «1» феррит переводится из $+B_r$ в состояние $-B_r$; при этом происходит значительное изменение индукции и в выходной обмотке появляется импульс большой амплитуды.

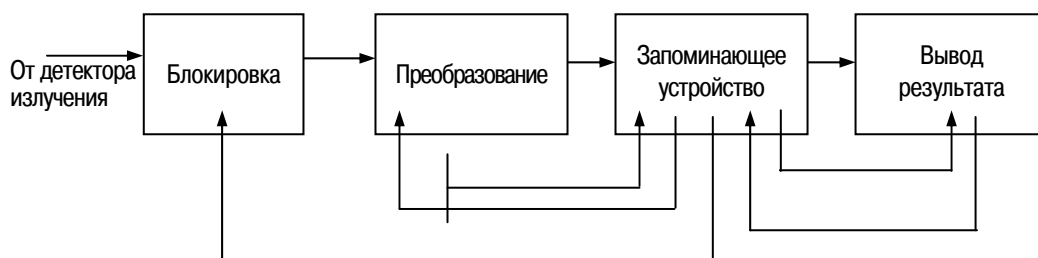


Рис. 4.1.7. Блок-схема многоканального анализатора

В запоминающих устройствах анализаторов, как правило, запись и считывание «0» и «1» ведутся методом совпадающих токов. При этом ферриты объединяются в матрицу (рис. 4.1.9).

В матрице роль обмоток ферритов выполняют пронизывающие провода. Шины X и Y указываются адресными. В них направляются токи записи и считывания. Возникающие при считывании сигналы памяти снимаются с обмотки, проходящей через ферриты в диагональном направлении.

Допустим, что нам требуется записать «1» в одном из ферритов матрицы. Для этого отыскиваются адресные шины X и Y , пронизывающие этот феррит, и в них направляются адресные токи $+0,5I$. Поскольку

через шины выбранного феррита протекает суммарный ток I , то этот феррит изменит состояние ($0 \rightarrow 1$), т. е. в нем записывается «1».

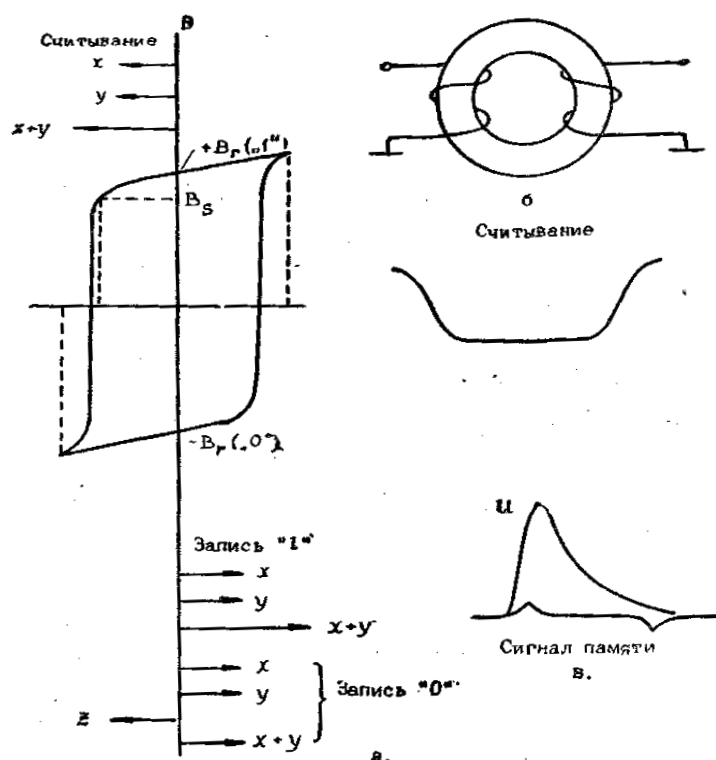


Рис. 4.1.8. Выходная обмотка

Все остальные ферриты, пронизанные шинами с током $+0,5I$, состояния не изменят, т. к. напряженность магнитного поля для этого недостаточна (рис. 4.1.8).

Аналогичным образом информация считывается. Для этого в соответствующие шины X и Y направляются отрицательные токи $0,5I$. Сигналы памяти снимаются со считывающей обмотки. Сигнал памяти при считывании «1» значительно больше сигнала, соответствующего «0», поэтому нетрудно определить значение ранее записанного числа.

Из плоских ферритовых матриц в запоминающем устройстве анализатора составляется куб памяти. Число ферритов в каждой матрице равно числу каналов. Отдельный канал состоит из вертикального столбца ферритов, расположенных во всех матрицах. Запоминание чисел в каналах ведется по двоичной системе, поэтому в каждой матрице размещаются ферриты одного разряда ($2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^n$). В зависимости от емкости каналов число матриц делается равным от 14 до 20.

Шины X и Y всех матриц соединены последовательно (на рис. 4.1.10 показано соединение только двух шин). В них подаются токи считывания и затем от адресного устройства. Считывающие обмотки

$W_{сч}$ каждой матрицы подключены к усилителям сигналов памяти арифметического устройства. Помимо шин X и Y и считывающей обмотки $W_{сч}$, в каждой матрице имеется еще одна обмотка – обмотка запрета z . Этой обмоткой во время записи предотвращается запоминание «1» в тех разрядах канала, где должны быть «0». Например, допустим, что в некоторый канал надо записать двоичное число 1001. Тогда адресным устройством в шины X и Y , проходящие через канал, направляются токи $+0,5I$. Кроме того, в обмотке запрета z второй и третьей матриц направляются токи $-0,5I$. Этим предотвращается запись «1» во втором и третьем разрядах канала, т. к. эквивалентные токи в них равны $0,5I$.

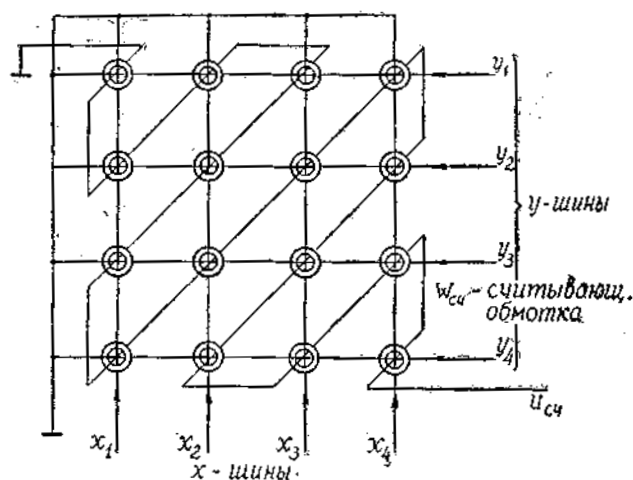


Рис. 4.1.9. Ферриты, объединенные в матрицу

В первом и четвертом разрядах эквивалентные токи равны $+I$ и, следовательно, в них запишется «1».

Адресное и арифметическое устройства состоят из двоичной пересчетной схемы с индикацией на передней панели анализатора и системы дешифраторов со схемами пропуска. Управление работой адресного и арифметического устройства осуществляется управляющим устройством, вырабатывающим последовательность считывания, добавления «+1», записи запрета.

После того, как адресным устройством «определены» шины X и Y , в них посылается импульс считывания $-0,5I$. При этом число из канала переводится в арифметическое устройство. Затем число из арифметического устройства (после добавления «+1») вновь записывается в том же канале. При этом в те же шины X и Y посылаются токи $+0,5I$, а в соответствующие обмотки z – токи $-0,5I$.

Время, требующееся для чтения и переписи числа в канале, составляется из времени перемагничивания ферритов и времени установления счетчиков и дешифраторов. Оно обычно не превышает 10–20 мкс.

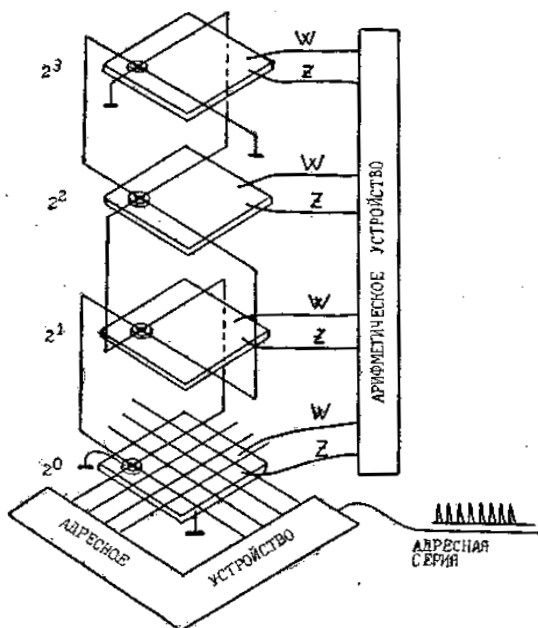


Рис. 4.1.10. Шины X и Y всех матриц, соединенные последовательно

Информация, накопленная в ферритовом запоминающем устройстве, выводится на электронно-лучевую трубку и цифропечатающую машину, самописец, перфоратор и магнитофон, а также визуальный индикатор в виде неоновых лампочек или цифровых индикаторов.

Блок-схема сцинтилляционного спектрометра

На рис. 4.1.11 показана блок-схема простейшего однокристалльного сцинтилляционного спектрометра. Его основными элементами являются:

1. Сцинтиллятор 1.
2. Фотоумножитель (ФЭУ) 2.
3. Эмиттерный повторитель 3.
4. Линейный усилитель 4.
5. Анализирующее и регистрирующее устройства 5 и 6.
6. Высоковольтный стабилизатор 7, обеспечивающий постоянство напряжения на электродах ФЭУ в пределах не хуже 0,1 %.
7. Сцинтилляционный кристалл и ФЭУ помещены в светонепроницаемый кожух 8.

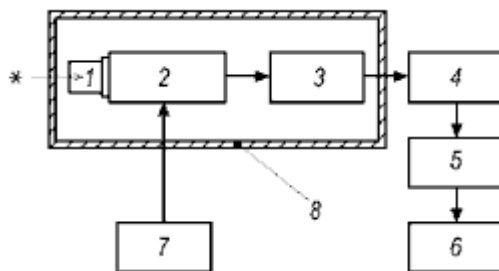


Рис. 4.1.11. Блок-схема сцинтилляционного спектрометра

При попадании гамма-квантов или частиц в сцинтиллятор в нем возникают световые вспышки (сцинтилляции). Сцинтилляции с помощью фотоэлектронного умножителя преобразуются в импульсы тока, которые усиливаются и анализируются электронной аппаратурой.

Интенсивность световой вспышки в сцинтилляторе и, следовательно, амплитуда импульса тока на выходе ФЭУ пропорциональны энергии, потерянной гамма-квантом или частицей в сцинтилляторе. Это свойство сцинтилляторов позволяет использовать их в спектрометрах гамма-лучей и частиц. Анализ амплитуд импульсов на выходе ФЭУ и анализ энергий и интенсивности γ -квантов и частиц осуществляется специальными процессорами, установленными в блоке вычислительной машины (персонального компьютера).

Сцинтилляционный процесс

Поглощение энергии веществом и её последующее испускание в виде видимого или близкого к видимому излучения известно как люминесценция. Причинами, вызывающими люминесценцию, могут быть свет, нагревание, механические напряжения, химические реакции и воздействия заряженных частиц на вещество-люминофор. Вспышки света, вызванные заряженными частицами и гамма-квантами, обычно называют сцинтилляциями. Вещество сцинтиллятора может быть твердым, жидким и газообразным. Рассмотрим сцинтилляционный процесс в твердом неорганическом кристаллическом сцинтилляторе.

Под действием быстрой заряженной частицы электроны кристалла переходят из заполненной зоны в зону проводимости или на промежуточные уровни, если они существуют в данном кристалле. Возвращение электронов в основное состояние сопровождается испусканием фотонов, длина волны которых обычно лежит в интервале 1000...7000 Å, а полуширина спектральной характеристики составляет 1000 Å. На рис. 4.1.12 показана спектральная характеристика кристалла NaJ(Tl) – одного из наиболее употребляемых сцинтилляторов. Спектр излучения кристалла должен перекрываться со спектральной характеристикой чувствительности применяемого ФЭУ.

В качестве кристаллов берут такие кристаллы, для которых полоса поглощения лежит за пределами частот люминесцентного излучения. Обычно средняя частота основной полосы поглощения больше частоты, соответствующей средней длине волны люминесценции. В этом случае кристаллы будут прозрачны для собственного излучения. Например, сцинтилляция в кристалле NaJ(Tl) имеет длину волны 4100 Å, а спектр поглощения лежит в ультрафиолетовой области и имеет максимумы при 2930 Å и 2340 Å. Поэтому прозрачность кристалла NaJ(Tl) для собственного излучения близка к 100 %.

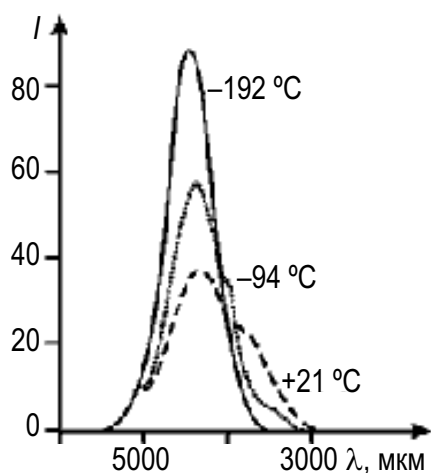


Рис. 4.1.12. Спектральная характеристика кристалла NaJ(Tl) при разных температурах

Часто в кристалл-сцинтиллятор вносят атомы примесных веществ – активаторов. Примерами таких сцинтилляторов могут служить йодистый натрий, активированный таллием – NaJ(Tl); сернистый цинк, активированный серебром – ZnS(Ag) и др. Обычно применяют активаторы с большим z .

Введение активатора (как правило, вещества с большим z) повышает световыход кристалла. Световыход – это отношение числа фотонов в одной сцинтилляции к энергии, потерянной заряженной частицей или гамма-квантом в сцинтилляторе.

Кристаллы, употребляемые в качестве сцинтилляторов, должны быть флюоресцирующими, т. е. высвечивание возбужденных состояний в них должно происходить сразу после возбуждения. Обычно кристаллы-сцинтилляторы имеют $\tau = 10^{-7} \dots 10^{-9}$ с.

Существуют два больших класса кристаллических сцинтилляторов – неорганические и органические. Неорганические кристаллы представляют собой соли различных металлов, чаще всего щелочных. Широкое применение получили кристаллы щелочных металлов, активированные таллием – NaJ(Tl), CsJ(Tl). Эти кристаллы обладают высокой плотностью и большим эффективным порядковым номером $z_{\text{эфф}}$, поэтому они часто применяются для регистрации и спектрометрии гамма-излучения. Отметим, что гамма-кванты непосредственно не производят ионизации, однако в процессе их взаимодействия с веществом сцинтиллятора в нем появляются электроны в результате фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар (см. раздел «Взаимодействие гамма-лучей с веществом»). Сечения этих процессов увеличиваются при больших значениях z , поэтому эффективность регистрации гамма-лучей в активированных неорганических кристаллах относительно велика. Например, эффективность регистрации гамма-лучей с энергий 1 МэВ кристаллом NaJ(Tl) составляет $\approx 20\%$.

Альфа-частицы и другие тяжелые заряженные частицы обычно регистрируются тонкими слоями микрокристаллов ZnS(Ag), ZnS(Cu), ZnO.

Общим недостатком неорганических кристаллов является их относительно большое время высвечивания $\tau \approx 10^{-7}$ с и более.

Для регистрации электронов неорганические кристаллы обычно не используются, так как электроны испытывают сильное рассеяние на поверхности кристалла и не проникают внутрь него. Электроны, как правило, регистрируются органическими кристаллами, представляющими собой ароматические углеводороды, в состав которых входят бензольные кольца. Примерами органических кристаллов могут служить кристаллы стильбена и антрацена. Преимуществами органических кристаллов являются их малое время высвечивания ($\tau \approx 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с) и высокая эффективность регистрации электронов.

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) служат для преобразования световых вспышек сцинтиллятора в импульсы электрического тока. Основными элементами ФЭУ являются фотокатод, система ускоряющих электродов и анод, собирающий электроны (см. рис. 4.1.13).



Рис. 4.1.13. Устройство фотоэлектронного умножителя

Сцинтиллятор с помощью специальных масел или клея, обеспечивающих оптический контакт, прикрепляется к торцу стеклянного баллона ФЭУ. Изнутри на этот торец наносится полупрозрачный металлический слой, представляющий собой фотокатод. Свет сцинтиллятора вырывает из фотокатода электроны, которые фокусируются на первый динод ФЭУ. Наибольшее распространение получили сурьмяно-цезиевые (Sb-Cs) фотокатоды.

Основными характеристиками ФЭУ являются:

- квантовый выход ε , который определяется как число фотоэлектронов, выбитых одним световым квантом (у лучших ФЭУ $\varepsilon \approx 0,2$);
- интегральная чувствительность – отношение фототока к падающему на фотокатод световому потоку белого света (у лучших ФЭУ интегральная чувствительность составляет ≈ 100 мкА/лм);

- спектральная характеристика, которая должна перекрываться со спектральной характеристикой сцинтиллятора. Обычно максимум спектральной чувствительности ФЭУ лежит в области $\lambda \approx 400$ нм;
- плотность тока тепловой эмиссии (электроны тепловой эмиссии создают фон, затрудняющий измерения);
- равномерность покрытия фотокатода, влияющая на амплитудное разрешение ФЭУ.

Попавшие на первый динод фотоэлектроны выбивают из него вторичные электроны, которые фокусируются на следующий динод. Материал динодов выбирается таким, чтобы коэффициент вторичной эмиссии был больше единицы. В этом случае происходит умножение числа электронов. Полный коэффициент усиления ФЭУ:

$$M = \theta (\delta)^n,$$

где θ – коэффициент, характеризующий сбор вторичных электронов динодов; n – число умножающих динодов; δ – коэффициент усиления динода.

Коэффициент усиления ФЭУ сильно зависит от значения ускоряющего напряжения на динодах. Эта зависимость выражается формулой:

$$M = M_0 e^{U/U_0},$$

где M_0 и U_0 – некоторые постоянные величины для данного ФЭУ.

Для поддержания постоянства величины M в пределах 1 % требуется стабильность напряжения U , подаваемого на ФЭУ, в пределах (0,01...0,1) %.

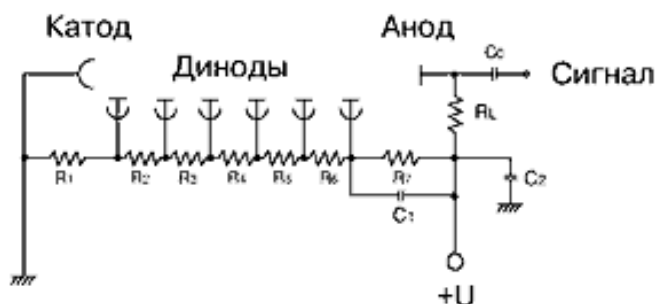


Рис. 4.1.14. Схема подачи высокого напряжения на диноды ФЭУ

Схема подачи высокого напряжения на диноды ФЭУ показана на рис. 14. Обычно $U \approx (500 \dots 1500)$ В, междудинодные напряжения порядка (75...100) В.

По своему применению ФЭУ делятся на спектрометрические и временные. Основным требованием, предъявляемым к спектрометрическим ФЭУ, является хорошая собственная амплитудная разрешающая способность. Обычно она составляет 3–5 %. Лучшие временные ФЭУ характеризуются временем нарастания импульса тока порядка 0,1 нс. Важной характеристикой ФЭУ является диаметр фотокатода. В зависи-

мости от назначения, применяют ФЭУ с диаметром фотокатода от 15 до 300 мм.

Взаимодействие гамма-излучения с веществом сцинтиллятора складывается из трех процессов – фотоэлектрического поглощения, комптоновского рассеяния и образования пар электрон-позитрон (см. раздел «Взаимодействие гамма-излучения с веществом»). Полная передача энергии гамма-кванта сцинтиллятору происходит главным образом в процессе фотопоглощения. При комптоновском рассеянии часть энергии уносится рассеянными гамма-квантами, вылетающими из кристалла. При образовании пар возникающие при аннигиляции гамма-кванты с энергией 511 кэВ также могут выйти из кристалла. В этих процессах величина вспышки уменьшается по сравнению с величиной вспышки, соответствующей полному поглощению. Таким образом, даже для монохроматического гамма-излучения форма спектра имеет сложный вид.

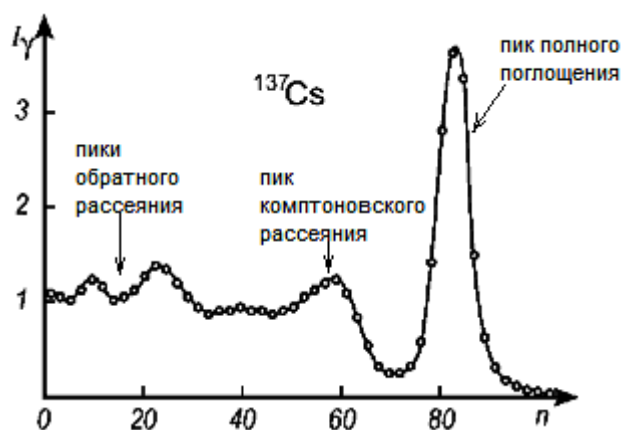


Рис. 4.1.15. Форма спектра ^{137}Cs , излучающего гамма-лучи с энергией 661,6 кэВ

На рис. 15 показана форма спектра ^{137}Cs , излучающего гамма-лучи с энергией 661,6 кэВ. Отчетливо виден пик полного поглощения в области 80-го канала.

Непрерывное распределение импульсов меньших амплитуд создается электронами отдачи, возникающими при комптоновском рассеянии гамма-квантов с последующим вылетом гамма-кванта из кристалла. Широкий максимум в области 60-го канала связан с поглощением электронов отдачи при комптоновском рассеянии гамма-квантов на большие углы в сцинтилляторе. Согласно теории комптоновского рассеяния (см. параграф «Взаимодействие гамма-излучения с веществом», раздел 2) энергия гамма-квантов при угле рассеяния 180° минимальна и равна:

$$h\nu'_{\text{мин}} = h\nu / [1 + 2h\nu / m_0c^2].$$

При этом энергия электронов максимальна и составляет:

$$E = h\nu - h\nu'_{\text{мин}}.$$

Согласно характеру углового распределения рассеянных гамма-квантов, число рассеянных на большие углы гамма-квантов сравнительно велико, с чем и связано появление широкого максимума, отстоящего от пика полного поглощения на величину $h\nu'_{\text{мин}}$. Происхождение другого максимума в начале спектра (в области 25-го канала) связано с регистрацией гамма-квантов, рассеянных на большие углы ($150\dots180^\circ$) в окружающей защите и в упаковке кристалла. Это так называемый «пик обратного рассеяния». Из формул, приведенных в разделе, посвященном рассмотрению комптоновского рассеяния, следует, что для гамма-излучений радиоактивных нуклидов, энергия которых, как правило, не превышает 3 МэВ, энергия электронов отдачи составляет (70...400) кэВ и именно при такой энергии в аппаратурных гамма-спектрах наблюдается пик обратного рассеяния.

При применении кристаллов NaJ(Tl) и CsJ(Tl) в области энергий падающих гамма-квантов ниже 300 кэВ виден пик вылета, связанный с вылетом рентгеновских квантов йода из кристалла. Рентгеновские кванты йода образуются в результате появления вакансии на К-оболочке атома йода при фотопоглощении. В том случае, когда рентгеновские кванты образовались вблизи поверхности кристалла, имеется определенная вероятность их вылета из кристалла и вспышка, соответствующая полному поглощению, ослабляется. Положение пика вылета соответствует энергии $h\nu - E_K$, где $E_K = 28,5$ кэВ – энергия К-рентгеновских лучей йода. В больших кристаллах относительная интенсивность пика вылета меньше, чем в кристаллах небольшого объема.

При энергии гамма-лучей больше 1022 кэВ в аппаратурном спектре появляются дополнительные пики, соответствующие вылету из кристалла одного или обоих аннигиляционных квантов (при $h\nu > 1022$ кэВ начинается процесс образования пар электрон-позитрон). Эти пики соответствуют энергиям $E_1 = (h\nu - 511)$ кэВ и $E_2 = (h\nu - 1022)$ кэВ.

Как правило, радиоактивные источники окружены защитой, чаще всего свинцовой. При попадании гамма-излучения или заряженных частиц в материал защиты в результате эффекта флюоресценции в ней возникает характеристическое рентгеновское излучение. Для свинца энергия этого излучения составляет 75 кэВ (К-рентгеновское излучение). Если не принято специальных мер, то в аппаратурном спектре появляется пик, соответствующий этой энергии.

Спектры монохроматического излучения характеризуются следующими величинами:

- разрешающей способностью R спектрометра, численно равной отношению полуширины пика полного поглощения к энергии гамма-излучения. Обычно для гамма-лучей с энергией (100...1000) кэВ разрешающая способность составляет (5...10) кэВ. С увеличением энергии

гамма-лучей разрешающая способность спектрометра улучшается, выполняется зависимость $R \approx 1/\sqrt{E\gamma}$;

- фоточастью, численно равной отношению площади, ограничивающей пик полного поглощения, к площади всего спектра. Для увеличения интенсивности пика полного поглощения следует брать кристаллы больших размеров;

- эффективностью, численно равной отношению числа гамма-квантов, зарегистрированных спектрометром, к числу испущенных гамма-квантов. Обычно эффективность составляет несколько процентов. Произведение фоточасти на эффективность называется фотоэффективностью.

В табл. 4.1.1 приведены значения энергии и интенсивности гамма-лучей ряда радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки гамма-спектрометров. Таблица составлена по данным, опубликованным в справочных изданиях к началу 2003 года.

Таблица 4.1.1

Данные о нуклидах, наиболее часто используемых для калибровки гамма-спектрометров по энергии и интенсивности

Нуклид	$T_{1/2}$	$E\gamma$, кэВ	I, % от числа распадов
^{22}Na	2,66 (2) * года	1274,53 (2) 511,0034 (14)	99,937 (15) 179 (2)
^{24}Na	14,659 (4) час.	1368,598 (6) 2753,995 (14)	100 99,944 (5)
^{51}Cr	27,704 (4) дн	320,084 (6)	98,3 (14)
^{54}Mn	312,20 (7) дн	834,826 (11)	99,975 (2)
^{60}Co	5,271 (1) года	1173,237 (4) 1332,501 (5)	99,90 (2) 99,9824 (5)
^{65}Zn	244,1 (2) дн	511,0034 (14) 1115,528 (22)	2,92 (3) 50,75 (10)
^{88}Y	106,61 (2) дн	898,065 (17) 1836,077 (18)	92,71 (7) 99,35 (1)
^{95}Nb	34,97 (3) дн	765,789(9)	99,79 (1)
^{109}Cd	1,2665 (11) года	88,034 (11)	3,6 (1)
^{114}In	49,51 (1) дн	190,28 (3) 558,43 (10) 725,24 (12)	15,4 (3) 4,4 (3) 4,3 (3)
^{137}Cs	30,0 (2) года	661,660 (2)	85,21 (7)
^{198}Au	2,6935 (4) дн	411,8045 (10)	95,50 (10)
^{203}Hg	46,60 (2) дн	279,188 (3)	81,5 (5)
^{207}Bi	32,2 (13) года	569,150 (19) 1063,10 (2) 1769,71 (4)	97,8 (4) 74,9 (15) 6,85 (20)

* В скобках указана погрешность: 2,66(2) означает $2,66 \cdot 10^{-2}$.

4.1.5. Анализатор импульсов АИ-128-2

Анализатор импульсов типа АИ-128-2 предназначен для измерения распределения импульсов по амплитуде при случайном появлении их во времени. Прибор обеспечивает измерение импульсов, вывод накопленной информации в цифровой или аналоговой форме. Предназначен для работы в стационарных и передвижных лабораториях при нормальных условиях окружающей среды (давление 760 ± 20 мм рт. ст., относительная влажность $(65 \pm 15) \%$, температура $(+10...+35) ^\circ\text{C}$).

Принцип работы анализатора импульсов АИ-128-2

Измерение статистического распределения амплитуд импульсов производится путем сортировки их в зависимости от величины амплитуды по каналам и накопления в течении времени измерения в каждом канале количества импульсов с соответствующей данному каналу амплитудой $A_i... (A_i + \Delta A)$, при этом ширина канала оказывается равной ΔA . Полученные после такого измерения данные можно интерпретировать как распределение плотности вероятности появления импульсов в установленном диапазоне амплитуд.

4.1.6. Подготовка прибора к работе

1. Включить тумблер «Сеть», источник высоковольтного напряжения БВ-2 (высокое напряжение должно быть выключено), питание усилителя сигналов с ФЭУ.
2. Регуляторы блока БВ-2-2 включить на минимум.
3. Включить высокое напряжение и плавно поднимать до 1,6 кВ.
4. На лицевой панели анализатора установить ручки управления в исходное положение в соответствии с табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.2

N, п/п	Ручки управления	Положение
1	Цифра-аналог	Аналог
2	Частота генератора	1 кГц
3	Разряды числа	5...12
4	Измер. – вывод – пров.	Вывод
5	ОСЦ-САМ-ЦПУ	ОСЦ
6	Число-время	Число
7	Мерт. вр. – жив. вр. – Σ зар. имп. – врем. внеш.	Σ зар. имп.
8	Канал	8 (левая), 56 (правая)
9	Разряд	16
10	Нижний порог	5
11	Верхний порог	4
12	Преобразование	1/2
13	Ослабление	16
14	Для фронта	0.4
15	СС-АС	АС

5. Установить в свинцовый домик источник Co^{60} .
6. Выполнить операцию «сброса» предыдущих операций на «0»: нажать «Стоп», установить в положение «Выход», нажать «Сброс».
7. Установить в режим измерения:
 - нажать кнопку «Стоп»;
 - установить «Измерение»;
 - нажать кнопку «Пуск».
8. Произвести набор в течение времени до выраженной регистрации формы спектра.
9. Нажать «Стоп».
10. Произвести операции градуировки шкалы спектра.

Градуировка прибора по известному источнику

Градуировка энергетической шкалы спектрометра производится по монохроматическому гамма-излучению радиоактивных изотопов с известной энергией.

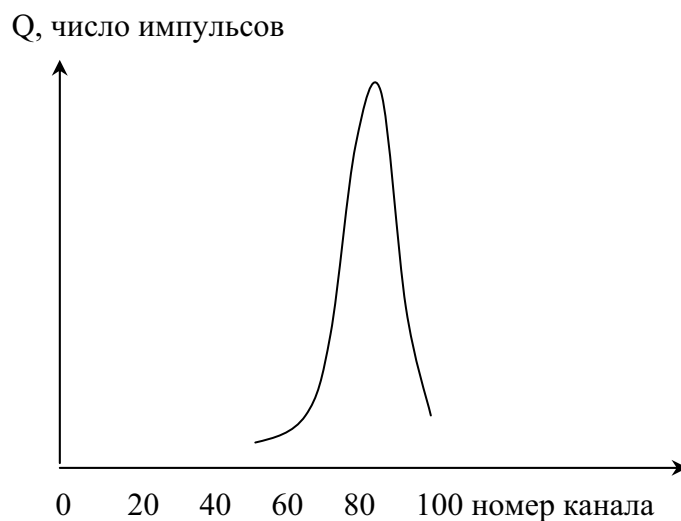


Рис. 4.1.16. Градуировка энергетической шкалы спектрометра

Известный изотоп помещают в сцинтилляционный спектрометр. На экране осциллографа будем наблюдать кривую гамма-спектра изотопа (рис. 4.1.16). Убедиться, что при уменьшении усиления пик смещается в сторону начала шкалы, при увеличении усиления в сторону конца шкалы.

Для градуировки энергетической шкалы необходимо определить энергию одного канала, т. е. отношение полной энергии изотопа к количеству каналов, соответствующих пику кривой.

4.1.7. Меры безопасности при работе с прибором

1. Работа с установкой разрешается после ознакомления с Инструкцией по технике безопасности, действующей в лаборатории кафедры; работа с электронными приборами установки производится с соблюдением «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителем».

2. В приборах имеются напряжения, опасные для жизни, поэтому категорически запрещается работа с прибором, если на нем нет защитного кожуха и корпус его не заземлен.

3. Запрещается работать при неисправных розетках, переносках, вилках, сетевых шнурах и производить вскрытие включенных приборов.

4. При работе с закрытыми радиоактивными источниками необходимо руководствоваться Нормами радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99.

5. Градуировочный источник устанавливается под окно счетчика в свинцовый защитный домик, что обеспечивает абсолютную безопасность работающего.

6. При переносе источника необходимо держать его как можно дальше от глаз.

7. После окончания эксперимента немедленно сдать источник преподавателю.

Следует помнить, что нарушение правил техники безопасности влечет за собой дисциплинарную, административную и/или уголовную ответственность.

4.1.8. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и описанием установки.

2. Изучить меры безопасности при работе с электронными приборами и радиоактивными гамма-источниками.

3. Подготовить прибор к работе.

4. Осуществить градуировку анализатора импульсов АИ-128-2.

5. Определить неизвестный изотоп по результатам градуировки гамма-спектрометра.

4.1.9. Контрольные вопросы

1. Что такое гамма-излучение?

2. В чем заключается сцинтилляционный метод регистрации и измерения ионизирующего излучения?

3. Сцинтилляционный счетчик. Его достоинства и недостатки.

4.1.10. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Перечень приборов и оборудования.
3. Основные теоретические сведения (блок-схема анализатора, пояснить принцип действия основных устройств).
4. Порядок выполнения работы.
5. Результаты градуировки гамма-спектрометра.
6. Выводы.

Список использованных источников

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 484 с.
2. Анализатор импульсов АИ-128-2. Техническое описание и инструкция по настройке.
3. Глушковский М.Е. Быстродействующие амплитудные анализаторы в современной ядерной физике и технике. – М.: Атомиздат, 1986. – 127 с.
4. Егоров Ю.А. Сцинтилляционный метод спектрометрии. Гамма-излучение и быстрые нейтроны. – М.: Госатомиздат, 1963. – 304 с.
5. Ивойлов Н.Г., Курбатов Г.Д., Лебедев В.Н., Садыков Э.К. Практикум по ядерной физике. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 125 с.
6. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1967. – 706 с.
7. Столярова Е.Л. Прикладная спектрометрия ионизирующих излучений. – М.: Госатомиздат, 1964. – 422 с.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99.

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

5.1. Исследование параметров интроскопа с газоразрядным люминесцентным преобразователем

5.1.1. Цель работы

Исследование разрешающей способности и контрастной чувствительности интроскопа с газоразрядным люминесцентным преобразователем.

5.1.2. Теоретическая часть

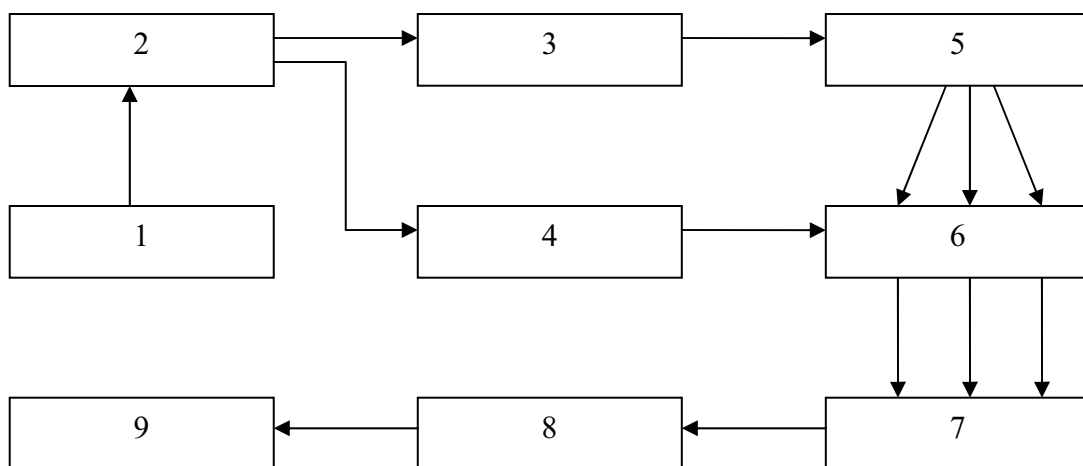
В основе газоразрядного преобразователя лежит питаемый импульсом высокого напряжения разрядный промежуток, образованный двумя плоско-параллельными электродами. Конструктивно он представляет собой герметичную двухэлектродную камеру, наполненную инертным газом до атмосферного давления. Расстояние между плоско-параллельными электродами, один из которых прозрачен для видимой части спектра излучения, а другой металлический, обычно не превышает одного сантиметра. Для ограничения тока в отдельных разрядах и их электрической развязки один из электродов отделен от газового объема диэлектриком.

Процесс формирования изображения в газоразрядных преобразователях (ГРП) можно разделить на две стадии: образование скрытого электронно-ионного изображения и трансформация его в видимое посредством газового разряда. Скрытое изображение формируется в газовом объеме первичными электронами, образованными при прохождении рентгеновского излучения через электроды и газовое наполнение детектора. Формирование оптического изображения в ГРП связано с протеканием процессов возбуждения в разрядах. В газоразрядных преобразователях с люминесцентным слоем, располагаемым на внутренней поверхности одного из электродов, происходит дополнительная трансформация ультрафиолетового излучения разрядов в видимое.

Можно инициировать несколько режимов работы ГРП, из которых в настоящее время исследованы: лавинный, лавинно-стримерный и стримерный.

Блок-схема установки интроскопа с ГРП

Упрощенная функциональная схема установки представлена на рис. 5.1.1.



*Рис. 5.1.1. Функциональная схема рентгеновского интроскопа:
 1 – задающий генератор; 2 – генератор командных импульсов;
 3 – канал генератора питания импульсного рентгеновского излучателя;
 4 – канал генератора питания преобразователя; 5 – импульсный рентгеновский излучатель; 6 – газоразрядный преобразователь с люминесцентным слоем;
 7 – передающая телевизионная камера; 8 – телевизионный блок памяти;
 9 – видеоконтрольное устройство*

Задающий генератор 1 вырабатывает импульсы с необходимой рабочей частотой, которые поступают на генератор командных импульсов 2. Управляющие импульсы генератора запускают каналы генераторов питания рентгеновской трубки (РТ) 3 и преобразователя 4; РТ излучателя 5 генерирует рентгеновское излучение, которое, пройдя объект контроля, попадает в газовый объём преобразователя 6, где создает первичную ионизацию. Высоковольтный импульс, поступающий на преобразователь 4, образует в газоразрядном объеме из первичной ионизации локализованные разряды, которые формируют видимое изображение объекта контроля. Это изображение можно наблюдать визуально, регистрировать фото или киноаппаратом, наблюдать и записывать с помощью телевизионной системы, имеющей блок памяти (7, 8, 9).

Параметры газоразрядного преобразователя в лавинном режиме

Анализ механизма и конкретные условия работы газоразрядных преобразователей позволяют выделить две основные стадии в процессе формирования в них изображения: образование скрытого изображения и трансформация его в видимое. Скрытое изображение формируется за счет ионизации газа-наполнителя ГРП электронами, вышедшими в межэлектродный зазор из электрода, и фото-, комптоновскими и Оже-электронами, образованными в рабочем газе, при взаимодействии с ними рентгеновского излучения. При подаче импульса питания на электроды скрытое изображение преобразуется в видимое изображение по-

средством газового разряда. Для лавинного режима работы газоразрядных преобразователей можно принять: количество электронов в одиночном разряде пропорционально начальной ионизации и яркость свечения лавины пропорциональна количеству электронов в лавине. Таким образом, качество изображения, получаемое в ГРП, зависит от средней плотности ионизации, созданной в межэлектродном зазоре, ее пространственного распределения и параметров лавины.

Средняя плотность ионизации и её пространственное распределение зависят от вероятности образования первичных электронов в межэлектродном зазоре и их пространственно-энергетического распределения.

В результате проведенных расчетов пространственно-энергетического распределения и вероятности образования фото-, комптоновских и Оже-электронов, образованных в газах (неоне, аргоне, криптоне, ксеноне), пространственно-энергетического распределения и вероятности выхода электронов из электродов (алюминиевого, дюралюминиевого, медного), рождённых при взаимодействии с ними рентгеновского излучения с энергией (40–100) кэВ, получены данные по вкладу электронов, образованных в газе, в среднюю плотность ионизации, которые приведены в табл. 5.1.1 (данные представлены в процентах).

Таблица 5.1.1

Вклад электронов, образованных в газе, в плотность ионизации

Электрод	Ne	Ar	Kr	Xe
Алюминий	30	72...45	95...90	99...97
Дюралюминий	15	65...35	95...85	98...95
Медь	3	30...7	80...45	92...72

Анализ гистограмм распределения средней плотности ионизации, которые получены в условиях резко очерченной границы потока рентгеновского излучения, показал, что они с удовлетворительной точностью описываются интегралом вероятности. Это справедливо при условии, что конечные размеры радиуса лавины не вносят существенного вклада в размытие границы изображения.

Размер радиуса лавины зависит от стадии ее развития и соотношения E/P между напряженностью электрического поля E и давлением газа P , которое ограничивается, с одной стороны, толщиной газоразрядного промежутка, а с другой- трудностями в получении импульсов питания малой длительности, менее 10^{-8} с. Проведенные в этих граничных условиях расчеты показали, что рабочие значения E/P находятся в диапазоне: $10 \leq E/P \leq 20$ В/см·торр, $15 \leq E/P \leq 30$ В/см·торр, $20 \leq E/P \leq 40$ В/см·торр, $25 \leq E/P \leq 40$ В/см·торр соответственно для ГРП, наполненных неоном, аргоном, криптоном и ксеноном.

Из сравнения значений радиусов лавины, найденных на разных стадиях ее развития, с величинами размытия границы изображения за счет нелокальной потери энергии электронами, сделан вывод: вклад радиуса лавины в нерезкость оптического изображения не превышает 10 % и нерезкость оптического изображения в основном определяется пространственным распределением средней плотности ионизации.

В диапазоне энергий рентгеновского излучения (40...100) кэВ собственная нерезкость наполненных неоном ГРП с дюралюминиевым электродом находится в интервале (5,4...6,8) мм, аргоном (3,4...5,4) мм, криптоном (1,0...2,8) мм, ксеноном (0,4...2,5) мм. Разрешающая способность при пороге контрастной чувствительности $K_{\text{п}} = 0,4\mu = (0,23...0,19)$ линий/мм, (0,38...0,22) линий/мм, (1,2...0,4) линий/мм, (3,0...0,5) линий/мм, соответственно. С увеличением порядкового номера вещества электрода собственная нерезкость ГРП увеличивается. Электрод преобразователя целесообразно изготавливать из вещества с малым порядковым номером.

Используя данные по влиянию вещества рабочего газа и электрода на формирование изображения и считая, что падающий поток рентгеновского излучения на ГРП распределён по закону Пуассона, получены зависимости, по которым можно определить требуемую дозу в импульсе ($P_{\text{имп}}$) как при работе в частотном, так и в одноимпульсном режиме.

Так, в одноимпульсном режиме:

$$P_{\text{имп}} = \frac{\mu_{\text{вз}}(E) \cdot E}{S \cdot P_1(E)}, \quad (1)$$

где $\mu_{\text{вз}}$ – массовый коэффициент передачи энергии для воздуха; E – энергия излучения; S – площадь элементарной площадки; $P_1(E)$ – вероятность появления первичного электрона в межэлектродном зазоре толщиной d_2 в объеме $\Delta V = S \cdot d_2$.

Проведенные по формуле расчеты показали, что в диапазоне энергий рентгеновского излучения (40...100) кэВ необходимая доза в импульсе составляет: для ГРП, наполненных неоном, – (50...95) мкР, аргоном – (20...70) мкР, криптоном – (4...18) мкР, ксеноном – (0,5...5) мкР.

Яркость ГРП в лавинном режиме определена при условии, что период следования импульсов излучения и питания преобразователя меньше времени инерции глаза, и находится в диапазоне (0,01–1) нит.

Экспериментальные исследования параметров ГРП в лавинном режиме были проведены на установке, состоящей из генератора питания ГРП, источника импульсного рентгеновского излучения и системы задержки импульса напряжения питания преобразователя относительно импульса излучения.

Источник питания преобразователя был создан по традиционной схеме RC-генератора и генерировал импульсы длительностью $(50 \dots 150) 10^{-9}$ с, с амплитудой $(5 \dots 40)$ кВ и частотой следования импульсов в интервале $(1 \dots 150)$ Гц.

Импульсный рентгеновский источник излучения на базе трубок с термоэмиссионным катодом типа 2-8БДМ5-110 и 14-30ВД10-150 имел длительность импульса $3 \cdot 10^{-6}$ с и позволял плавно изменять дозу в импульсе на расстоянии 1 м в интервале $(0 \dots 100)$ мкР. Максимум в спектральном распределении излучения у такого источника находился в диапазоне $(35 \dots 60)$ кэВ при изменении анодного напряжения трубки в интервале $(120 \dots 200)$ кВ, что составляет $\sim 30\%$ от максимального напряжения в импульсе. Спектральные распределения были получены с помощью термолюминесцентных кристаллов LiF, погрешность измерений $(5-10)\%$.

Собственная нерезкость ГРП с дюралюминиевым электродом, рассчитанная для данного спектра в интервале анодных напряжений (U_a) излучателя

$(125 \dots 195)$ кВ, составляет при неоновом наполнении 6,8 мм, аргоновом 5,2 мм, криптоновом $(1,6 \dots 2,2)$ мм, ксеноновом $(1 \dots 1,5)$ мм. Разрешающая способность – 0,22 линий/мм; 0,28 линий/мм; $(0,9 \dots 0,65)$ линий/мм; $(1,5 \dots 1)$ линий/мм. Проволочка диаметром 0,4 мм выявляется с помощью ГРП, наполненных неоном, аргоном, криптоном, ксеноном, если $U_a < 125$ кВ; $U_a < 140$ кВ; $U_a < 200$ кВ; и $U_a < 220$ кВ, соответственно.

Исследования зависимости относительной яркости от напряженности электрического поля в газоразрядном промежутке, проведенные с помощью интегрального фотометра, показали, что лавинная область для ГРП, наполненных неоном, находится в диапазоне $(7 \dots 15)$ В/см торр, аргоном $(10 \dots 25)$ В/см торр, криптоном $(15 \dots 30)$ В/см торр, ксеноном $(18 \dots 35)$ В/см торр. Яркость ГРП при постоянном значении Е/Р увеличивается пропорционально дозе излучения в импульсе до получения предельных характеристик изображения по разрешающей способности и контрастной чувствительности. После этого пропорциональность нарушается, и увеличение дозы в импульсе, например, в пять раз, приводит к увеличению яркости ГРП не более чем в 1,5 раза. Изменение напряжения на аноде рентгеновской трубки в диапазоне $(125 \dots 195)$ кВ не приводит к заметному увеличению яркости детекторов. Погрешность относительных измерений яркости $(10-25)\%$.

Измерения абсолютной яркости, проведенные с использованием фотографического метода (погрешность $35-40\%$), показали, что яркость газоразрядных преобразователей, наполненных аргоном, криптоном, ксеноном, измеренная при частоте следования импульсов 25 Гц на

стадии перехода лавины в стример, составляет $0,02 \text{ кд/м}^2$, и у ГРП, наполненных неоном, $\sim 0,2 \text{ кд/м}^2$.

Собственная нерезкость ГРП (V_c) определялась по размыванию изображения резкого края, сформированного тонкой свинцовой пластиной. Погрешность измерений (10–20) %. На основе экспериментальных данных получены выражения, с удовлетворительной точностью описывающие зависимость V_c от величины максимального амплитудного значения напряжения на аноде рентгеновской трубки, типа рабочего газа, материала электрода, в области (125–195) кВ.

$$V_c(X_e, K_y) = \frac{Z_{Xe}}{Z_z} (4,1 \cdot 10^{-5} U_a^2 - 5,3 \cdot 10^{-3} U_a + 1,2), \quad (2)$$

$$U_c = (\text{Ne, Ar}) = 5,7 \left[\frac{Z_m \cdot Z_{Ar}^2}{Z_{Al} \cdot Z_z^2} \right], \quad (3)$$

где Z_{Xe} , Z_{Ar} , Z_z – порядковый номер ксенона, аргона, используемого газа, соответственно, Z_{Al} , Z_m – порядковый номер алюминия и материала электрода.

Разрешающая способность ГРП определялась с помощью свинцовой миры и собственной нерезкости.

Установлено, что при пороговом контрасте яркости $K_n = 0,04$ в области напряжений на излучателе (125...195) кВ у наполненного неоном ГРП с дюралюминиевым электродом, она составляет 0,17 линий/мм, аргоном 0,25 линий/мм, криптоном (0,8...0,6) линий/мм, ксеноном (1,2...0,85) линий/мм.

Коэффициент контрастности ГРП (γ) и минимально выявляемый рентгеновский контраст находились фотометрированием негативов изображения ступенчатого алюминиевого дефектометра (индикатора чувствительности). При этом ширина ступеньки дефектометра (l) была выбрана таким образом, чтобы $3l > 2V_c$. В этом случае $\gamma = K_{on} / K_l$. Оптический контраст находился фотометрированием негативов изображений дефектометра, полученных на фотопленке. Рентгеновский контраст – с помощью рентгеновской пленки. В результате исследований получено: коэффициент контрастности ГРП, наполненных неоном, составляет 0,13, аргоном – 0,26, криптоном – 0,5, ксеноном – 0,6. Приняв пороговый контраст яркости глаза (при яркости преобразователя (0,02...0,2) кд/м^2) $K_n = 0,04$, определен минимально выявляемый контраст, составляющий, соответственно, 30 %, 15 %, 8 %, 7 %. Погрешность измерений (15–20) %.

Все измерения проводились при оптимальном времени задержки, которое для ГРП, наполненных аргоном, криптоном, ксеноном составило $(4...6) \cdot 10^{-7} \text{ с}$, неоном $(4...10) \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

Параметры газоразрядного преобразователя в стримерном режиме работы

При дальнейшем увеличении рабочей напряженности поля в газоразрядном промежутке и выходе из границ лавинного режима, в газовом объеме преобразователя устанавливается стримерная стадия разряда. Преобразователь, работающий в этом режиме, имеет более высокую яркость видимого изображения, что особенно важно при стробоскопической фото-кинорегистрации быстропротекающих процессов, скрытых непрозрачными преградами.

В связи с этим была разработана физико-математическая модель формирования изображения в ГРП на стримерной стадии разряда, устанавливающая наиболее существенные связи между параметрами преобразователя и его конструкцией, газовым наполнением и режимом облучения.

Установлено, что основную роль в развитии стримерных разрядов играют центры ионизации. При регистрации рентгеновских квантов с энергией $36 \leq E_1 \leq 200$ кэВ в ксеноне наиболее крупные центры ионизации возникают при фотоэффекте на К-уровне ксенона и последующем заполнении образовавшейся вакансии в процессе каскадного Оже-эффекта. Величина центров – 400–500 свободных электронов. Вероятность создания крупного центра быстрыми электронами посредством большой потери энергии в пределах сферы ионизации не превышает 5 %. Вероятность создания такого же центра посредством коллективной потери энергии электронами в пределах одной сферы ионизации пренебрежимо мала ($10^{-2} \dots 10^{-3}$). При торможении быстрых электронов в газе основные центры ионизации возникают в конце пробега. Вероятность создания таких центров при энергии электронов $E_0 \leq 30$ кэВ и типовых размерах ГРП составляет (70–100) %. Однако роль этих центров в формировании видимого изображения незначительна, поскольку в них число свободных электронов меньше (~ 250). Вклад флуоресцентных квантов, возникающих при фотоэффекте на атомах ксенона, не превышает 8 %.

С учетом того, что при энергии рентгеновских квантов 200 кэВ основной вклад в их регистрацию преобразователем, работающим на стримерной стадии разряда, вносит фотоэффект на атомах ксенона, для эффективности регистрации получено следующее выражение:

$$\eta = 0,1 \cdot \mu(E_1) \cdot d_2, \quad (4)$$

где $\mu(E_1)$ – линейный коэффициент ослабления излучения посредством фотоэффекта на атомах газа, d_2 – толщина газового слоя.

Несмотря на относительно низкую эффективность регистрации ($\eta \leq 1$ %), дозная чувствительность, вследствие высокого коэффициента усиления и малой допустимой плотности разрядов, очень высокая и составляет, при $E_1 \leq 100$ кэВ, единицы микрорентген. Максимальная дости-

жимая плотность разрядов в ГРП на стримерной стадии ограничена их поперечными размерами и слиянием разрядов в процессе своего развития. Анализ развития стримерных разрядов привел к выводу, что разряды развиваются независимо, если расстояние между их центрами в 1,5–2 раза превышает диаметр разряда, что соответствует плотности 10^{-2} см^{-2} .

Изображения, получаемые на газоразрядном преобразователе, имеют заметные статистические шумы, что обусловлено статистическим характером образования и визуализации скрытого центра ионизации. Отношение сигнал/шум Ψ_p , обусловленное статистическим характером регистрации квантов излучения и визуализации скрытого изображения, имеет вид:

$$\psi_p = \sqrt{n_\gamma \cdot \eta \cdot S_{я}} \cdot \sqrt{\frac{S}{S_{я}}}, \quad (5)$$

где n_γ – плотность потока квантов, необходимая для создания предельной плотности разрядов 2 мм^{-2} ; η – эффективность регистрации; $S_{я}$ – площадь элементарной разрядной ячейки ($\sim 0,125 \text{ мм}^2$); S – рабочая площадь преобразователя.

В табл. 5.1.2 представлены значения, иллюстрирующие значительный «ход с жесткостью» газоразрядного преобразователя, вследствие чего практическая область их работы без конвертирующего электрода для моноэнергетического и эффективного значения непрерывного излучения ограничена энергией $\sim 100 \text{ кэВ}$.

Таблица 5.1.2

$E_1 (\text{кэВ})$	$\eta (\%)$	$n_1 (\text{см}^{-2})$	$D_1 (\text{мкР})$
40	1,3	$2 \cdot 10^4$	0,9
50	0,7	$3,4 \cdot 10^4$	1,2
80	0,2	$1,5 \cdot 10^5$	4,2
100	0,1	$2,3 \cdot 10^5$	9,5
150	0,034	$7,3 \cdot 10^5$	49
200	0,015	$1,6 \cdot 10^6$	154
300	0,005	$5,1 \cdot 10^6$	798

Дефектоскопическая чувствительность в стробоскопическом режиме при $\mu_n \times \delta \ll 1$ выражается формулой:

$$\delta = \frac{\sqrt{2} \cdot t_\alpha \cdot B}{\mu \cdot \sqrt{\bar{N}_p \cdot (a - U_n) \cdot (b - U_n)}}, \quad (6)$$

где μ_n – массовый коэффициент поглощения рентгеновского излучения в материале объекта; t_α – коэффициент Стьюдента; \bar{N}_p – средняя плотность разрядов; U_n – внутренняя нерезкость преобразователя; a , b – линейные размеры дефекта; B – фактор накопления.

В табл. 5.1.3 приведены расчетные значения чувствительности для алюминия при вероятности обнаружения $P_{об} = 0,95$ ($t_{\alpha} = 2,6$), $B = 1$.

Таблица 5.1.3

Расчетные значения чувствительности

E_{α} (кэВ)	δ	δ	δ
	$S = 10 \text{ мм}^2$	$S = 10^2 \text{ мм}^2$	$S = 10^3 \text{ мм}^2$
40	3,6	1,5	0,5
50	5,5	2,3	0,73
100	12	5	1,6
150	14,8	6,2	2

Газоразрядный преобразователь в одноимпульсном режиме позволяет обнаружить только относительно крупные дефекты. Это обусловлено допустимой плотностью разрядов на преобразователе. Очевидно, что чувствительность ГРП к обнаружению может быть повышена режимом накопления в $\sqrt{N_k}$ раз, где N_k – число вспышек преобразователя на один кадр фотопленки или телевизионной установки, но это повышение ограничено в пределе другими причинами, например, внутренней нерезкостью преобразователя.

Большое значение для детекторов, работающих в стробоскопическом режиме, имеет мертвое время. Рассмотрение послеразрядной стадии в преобразователе позволило сделать вывод, что на лавинной и ранней стримерной стадиях развития разрядов определяющую роль в уменьшении концентрации свободных электронов играют процессы рекомбинации и прилипания. Мертвое время составляет 10^{-4} с, что обеспечивает нормальную работу детектора при частоте 10^4 Гц. В предыдущей и искровой стадиях главное значение приобретает процесс охлаждения газа в разрядных каналах.

Экспериментальные исследования параметров преобразователя в стримерном режиме проводились по той же методике, что и в лавинном.

Собственная нерезкость преобразователя с ксеноновым наполнением, определенная методом проведения касательной к краевой функции (изображение края свинцовой пластины), составляет $U_c = (1,3 \dots 1,8)$ мм и в пределах погрешности не зависит от режима. Разрешающая способность преобразователей, рассчитанная с использованием полученных значений нерезкости по формуле $\mu \cdot U_c = 1,5$, равна $(1,15 \dots 0,83)$ линий/мм.

Предельная контрастная чувствительность, достигнутая в экспериментах, составляет 8 %, при толщине алюминия 25 мм и эффективной энергии рентгеновского излучения 40 кэВ.

Экспериментально измеренные значения мертвого времени малы ($100 \dots 200$ мкс) и предельная частота работы превышает 10 кГц.

Газоразрядные преобразователи с люминесцентным слоем (ГРЛП)

Значительная доля энергии, излучаемой зарядом в инертных газах на лавинной и ранней стримерной стадиях, приходится на ультрафиолетовую (УФ) область. Это обусловлено низкой средней энергией электронов в таких разрядах и высоким сечением возбуждения атомов инертного газа на резонансные уровни. Отношения квантовых выходов резонансного и видимого излучений для лавинно-стримерного разряда ($n_e \approx 10^8$) в Ne, Ar, Kr, и Xe соответственно равны $2,5 \cdot 10^2$; $3 \cdot 10^3$; $2,3 \cdot 10^3$ и $1,6 \cdot 10^3$. Данные получены в результате анализа процессов возбуждения атомов инертных газов при электрон-атомных столкновениях. Выход резонансного излучения существенно зависит от рабочей напряженности электрического поля и, например, для Xe уменьшается примерно в 6 раз при увеличении напряженности поля с 12 В/см·торр. до 50 В/см·торр.

Исследования по использованию УФ-излучения с целью повышения светоотдачи преобразователя были проведены в двух направлениях. Во-первых, исследовалась возможность преобразования УФ-излучения в видимое в месте его образования с помощью газовых добавок. Здесь лучшие результаты получены на смесях инертных газов с небольшими добавками тяжелых углеводородов (этилен, пропилен и т. д.). Так, на смеси 99,3 % Xe + 0,7 % C₂H₆ (этилен) яркость изображения увеличилась на порядок по сравнению с ксеноновым наполнением, а разрешающая способность составила $\sim (0,5 \dots 0,6)$ линий/мм. Снижение разрешающей способности для смеси с малой концентрацией примеси связано с недостаточно высоким коэффициентом фотопоглощения, а увеличение концентрации отрицательно сказывается на развитии разряда. При действии УФ-излучения одновременно с фотовозбуждением происходит фотодиссоциация молекул углеводородов, что снижает коэффициент преобразования и требует частой смены наполняющего газа.

Более перспективным оказалось использование в качестве конверторов УФ-излучения люминесцентных слоев, располагаемых на внутренней поверхности электродов преобразователя. Высокая эффективность возбуждения УФ-излучением большинства твердых люминофоров, разнообразие их свойств позволяют на два-три порядка повысить светоотдачу ГРП, создать преобразователи с различным спектром и длительностью высвечивания, запомнить изображение и т. д.

Основным недостатком данного метода является то, что при преобразовании объемного ультрафиолетового «изображения» в плоское на люминесцентном слое происходит неизбежная потеря информации.

Как показали исследования, при атмосферном давлении и выше резонансно-возбужденные атомы инертного газа с большой вероятностью участвуют в реакции тройных соударений, в результате которой обра-

зуются возбужденные квазимолекулы. Излучение молекул распространяется в газе практически без поглощения, т. е. имеет место лучевой механизм распространения. При малой величине газоразрядного промежутка (< 1 мм) или небольших давлениях (десятки торр) резонансное излучение уходит на стенки в результате множества переизлучений и этот процесс носит диффузионный характер. Расчетные краевые функции для лучевого и диффузионного механизмов распространения соответственно имеют вид:

$$F_l(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{d_z}{x} - l_l \cdot \left(1 + \frac{d_z^2}{x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (7)$$

$$F_d(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \times \exp\left(\frac{\pi \times x}{d_z}\right), & x \leq 0 \\ 1 - \frac{1}{2} \times \exp\left(\frac{-\pi \times x}{d_z}\right), & x \geq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где d_z – величина газоразрядного промежутка.

Экспериментальная нерезкость изображения на лавинной стадии разряда совпадает с рассчитанной по лучевой модели и для Хе составляет 7...8 мм ($d_z = 8$ мм). При переходе к стримерному режиму нерезкость изображения значительно уменьшается (2...3 мм), что связано с подчеркиванием краев за счет перетекания энергии с более затененных участков преобразователя через граничные разряды.

Для предельной контрастной чувствительности ГРЛП в стримерном режиме работы (при $E_{\text{лвф.}} = 40$ кэВ, $d_z = 8$ мм, газ Хе при давлении $P = 1$ атм) на толщине алюминия 15 мм получено значение 12 %, при разрешающей способности (0,5...0,75) лин/мм. Более высокая контрастная чувствительность ($\sim 5-6$ %) достигнута при работе преобразователя в области лавинно-стримерного перехода.

Яркость газоразрядно-люминесцентного преобразователя зависит от типа применяемого люминофора, структуры слоя, чистоты газового наполнения и режима питания. Максимальная яркость ($40...60$ кд/м²) получена в преобразователе с люминесцентным слоем на основе виллемита ($\text{Zn}_2\text{SiO}_4 : \text{Mn}$) и ксеноновом наполнении с $P = 1$ атм. При стробоскопической фоторегистрации динамических процессов целесообразно применять органические с коротким временем высвечивания люминофоры (терфенил, кватерфенил). Существенно снижается яркость изображения при добавке к инертному газу воздуха, вследствие высокой вероятности тушения резонансно возбужденных атомов молекулами O_2 , N_2 . Так, при изменении остаточного давления воздуха в преобразователе с 0,2 до 2 торр, яркость снижается примерно в 3 раза.

Области применения и перспективы развития газоразрядных преобразователей

В силу высокой дозовой чувствительности газоразрядные преобразователи могут найти применение прежде всего в экспрессной рентгеновской диагностике. Импульсный режим работы ГРП позволяет производить исследование внутренних органов биологических объектов в динамике. Короткое время получения кадра изображения ($\sim 10^{-7}$ с), высокая предельная частота работы (10^4 Гц) и высокая импульсная яркость ($10^6 \dots 10^7$) кд/м² дают возможность использовать его при рентгеновской стробоскопии объектов, скрытых непрозрачными преградами и движущихся со скоростями ($10^3 \dots 10^4$) м/с. Это основные области применения преобразователей, и круг решаемых здесь задач будет непременно расширяться по мере повышения технологичности детектора, улучшения качества изображения и расширения энергетического и видимого диапазона регистрируемых излучений.

Ближайшей перспективой развития преобразователей в области технологии является создание отпаянных, долговременно работающих ГРП на промышленной основе. В сочетании с использованием серийных импульсных рентгеновских аппаратов и миниатюризацией схем питания, это позволит создать компактные переносные приборы для медицинской рентгенодиагностики.

Применение в преобразователях конверторов определенного вида дает возможность повысить эффективность регистрации рентгеновского (свыше 10 кэВ) и гамма-излучений, регистрировать потоки нейтронов, электронов высоких энергий и т. д. С точки зрения повышения эффективности регистрации рентгеновского излучения, увеличения яркости свечения представляет интерес разработка преобразователей с высоким давлением наполняющего газа (десятки атмосфер).

В ГРЛП качественное изображение может быть получено в результате применения коллимационных систем для ультрафиолетового излучения, люминофоров с нелинейной зависимостью яркости от интенсивности возбуждающего излучения, люминесцентных систем с накоплением и запоминанием изображения, низковольтных катодолюминофоров для регистрации электронов газовых разрядов. Кроме этого, определенный резерв в улучшении качества изображения у ГРП заключен в оптимизации параметров генератора питания, развязывающих диэлектрических слоев и состава газового наполнения.

5.1.3. Меры безопасности

При работе с электронными приборами

1. Работа с установкой разрешается только после ознакомления с инструкцией по технике безопасности, действующей в лабораториях кафедры.
2. Работы с электронными приборами установки на месте производятся с соблюдением «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».
3. В приборах имеются напряжения, опасные для жизни, поэтому категорически запрещается работа с прибором, если на нем нет защитного кожуха и корпус его не заземлен.

При работе с рентгеновским аппаратом

1. Включать рентгеновский аппарат на минимально необходимое для измерения время.
2. Пучок рентгеновского излучения направлять в сторону, противоположную нахождению людей.
3. Рентгеновский аппарат включать после подготовки и настройки измерительной аппаратуры.

5.1.4. Задание

1. Ознакомиться с функциональной схемой рентгеновского интроскопа с ГРЛП.
2. Изучить устройство ГРЛП.
3. Ознакомиться с установкой.
4. Разобраться с геометрией, реализуемой в интроскопе (взаимное расположение источника излучения, объекта контроля, ГРЛП, защиты от излучения, пульта управления).
5. Изучить последовательность включения узлов установки.
6. Подготовить установку к работе.
Установить необходимое или рекомендуемое расстояния.
Установить дефектометр (миру) по рекомендации преподавателя или своему усмотрению.
7. Включить установку в соответствии с указаниями преподавателя.
8. Пронаблюдать работу установки в различных режимах (частотном, одноимпульсном, при различных напряжениях накала рентгеновской трубки, при различных задержках импульсов питания относительно импульсов излучения).
9. Определить четко различимую группу линий изображения миры, причем каждый член группы записывает свои показания отдельно. В последующем все показания усредняются. По результату определяется разрешающая способность ГРЛП.

10. Установить ступенчатый клин, предварительно отключив источник излучения и питание на ГРЛП.
11. Включить источник излучения и питание ГРЛП.
12. Определить оптический контраст.
13. Выключить установку.
14. Отключить сетевой рубильник.

5.1.5. Контрольные вопросы

1. Каков порядок включения установки?
2. Меры предосторожности при работе с установкой.
3. Принцип работы газоразрядного преобразователя.
4. Области применения рентгеновского интроскопа с ГРП.
5. Описать качественный состав используемого в работе рентгеновского излучения.

5.1.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Функциональная схема и принадлежности.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Данные геометрии эксперимента.
5. Результаты измерений и расчетов.
6. Выводы.
7. Краткие ответы на контрольные вопросы.

Список использованных источников

1. Кулешов В.К., Выстропов В.И., Дель В.Д., Дубов А.Н. О применении газоразрядных преобразователей в интроскопии // Изв. ТПИ. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – С. 7.
2. Кулешов В.К., Выстропов В.И. Применение газоразрядных преобразователей в интроскопии // Сборник статей «Аппаратура и методы неразрушающего контроля». – М.: Атомиздат, 1978. – С. 7.
3. Кулешов В.К., Выстропов В.И. Применение газоразрядных преобразователей в интроскопии // Труды НИИ ЭИ. – Вып. 1. – М.: Атомиздат, 1978. – С. 8.
4. Кулешов В.К., Акимов А.Ю., Дель В.Д., Кононов М.Ю. Разработка и создание интроскопов на базе газоразрядного преобразователя с использованием низкоэнергетических рентгеновских аппаратов // Деп. ВНИИТЦ № В 882012 1980. – С. 25.
5. Кулешов В.К., Абрамов В.П., Варваренко В.И., Дель В.Д., Смирнов А.Н. Рентгендиагностическая установка на базе газоразрядного преобразователя // Тезисы докладов 6-го Всесоюз. симп. «Люми-

несцентные приемники и преобразователи ионизирующих излучений», Львов, 1988. – С. 1.

6. Кулешов В.К., Дель В.Д., Ланшаков В.Н. Газоразрядный преобразователь рентгеновского изображения // Сборник издан. НИИ ЭТИ. Аналитический обзор за 1985–1989 гг. № 4984, 1989. – С. 85.

5.2. Исследование радиационного плотномера со счетчиком Гейгера–Мюллера

5.2.1. Цель работы

1. С помощью радиационного плотномера:

- экспериментально определить линейный коэффициент ослабления μ для образцов, имеющих одинаковую толщину d ;
- найти плотность образца по коэффициенту и табличным данным.

2. С помощью радиационного толщиномера:

- экспериментально определить μ ; d для образцов из одинакового материала;
- найти толщину образца по коэффициенту ослабления и табличным данным.

5.2.2. Теоретические сведения

В основе радиационных методов толщинометрии (плотнометрии) лежит применение ионизирующего излучения, прохождение которого через вещество происходит по экспоненциальному закону ослабления.

Ионизирующее излучение испытывает ослабление в результате осуществления процессов взаимодействия с веществом среды, через которую оно распространяется. Различают ослабление в условиях «узкого» и «широкого» пучка.

«Узкий» пучок фотонов – это пучок, коллимированный в «хорошей» геометрии: когда вторичное излучение, возникающее при прохождении фотонов через поглотитель, в детектор не попадает и закон ослабления имеет вид:

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления фотонов с энергией $h\nu_0$.

Линейный коэффициент ослабления μ определяется как отношение доли dN/N косвенно ионизирующих частиц данной энергии, претерпевших взаимодействие при прохождении элементарного пути dx в среде, к длине этого пути:

$$\mu = -\frac{dN}{N dx}. \quad (2)$$

Если рассматривается не толщина среды, а ее масса, то аналогичным путем вводится массовый коэффициент ослабления:

$$\frac{\mu}{\rho} = -\frac{dN}{\rho N dx}. \quad (3)$$

Для фотонного излучения линейный коэффициент ослабления является суммой линейных коэффициентов ослабления, обусловленных фотоэлектрическим эффектом, некогерентным рассеянием и образованием электронно-позитронных пар, т. е.:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (4)$$

или для массового коэффициента ослабления:

$$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma/\rho + \kappa/\rho. \quad (5)$$

Для сложного вещества рекомендуется пользоваться следующей формулой:

$$\mu = \sum \mu_i n_i, \quad (6)$$

где n_i – доля i -го элемента; μ_i – линейный коэффициент ослабления i -го элемента.

Значение величины коэффициента линейного ослабления зависит от z вещества и энергии фотонов. В качестве примера на рис. 5.2.1 приведена зависимость линейного коэффициента ослабления для свинца от изменения энергии фотонов.

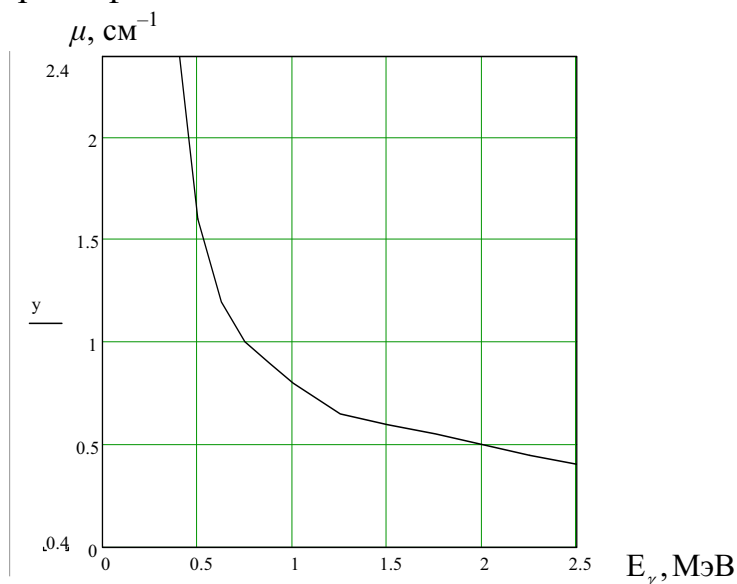


Рис. 5.2.1. Зависимость линейного коэффициента ослабления для свинца от энергии фотонов

Схема эксперимента представлена на рис. 5.2.2. В условиях эксперимента обеспечивается геометрия узкого пучка. В качестве источника излучения используется радионуклид ^{60}Co ($\overline{h\nu_0} = 1,25$ МэВ).

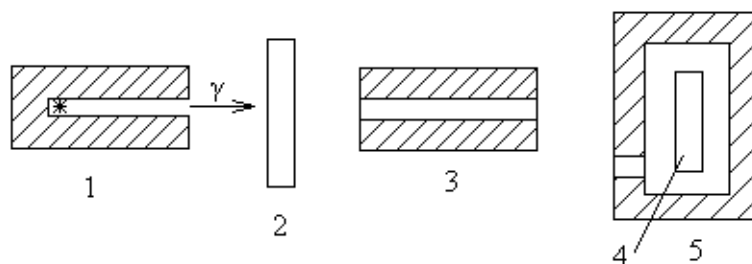


Рис. 5.2.2. Схема эксперимента:

1 – источник излучения; 2 – поглотитель; 3 – коллиматор; 4 – счетчик;
5 – свинцовый домик

Если плотность потока фотонов в месте расположения детектора при отсутствии поглотителя Φ_0 , то после установки поглотителя толщиной d плотность потока будет равна:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu d} \quad (7)$$

или

$$\mu d = \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}. \quad (8)$$

Отсюда

для плотномера
$$\mu = \frac{1}{d} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}; \quad (9)$$

для толщиномера
$$d = \frac{1}{\mu} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}. \quad (10)$$

Скорость счета и плотность потока фотонов связаны соотношением:

$$\kappa n - n_\phi = b\Phi, \quad (11)$$

где n – скорость счета счетчика; n_ϕ – скорость счета фона; b – эффективность установки при регистрации фотонов данной энергии; κ – поправка на мертвое время.

Следовательно, значения плотности и толщины через скорость счета:

$$\mu = 1 / d \ln(n_0 \kappa - n_\phi) / (n \kappa - n_\phi); \quad (12)$$

$$d = 1 / \mu \ln(n_0 \kappa - n_\phi) / (n \kappa - n_\phi). \quad (13)$$

5.2.3. Общие сведения о толщиномерах

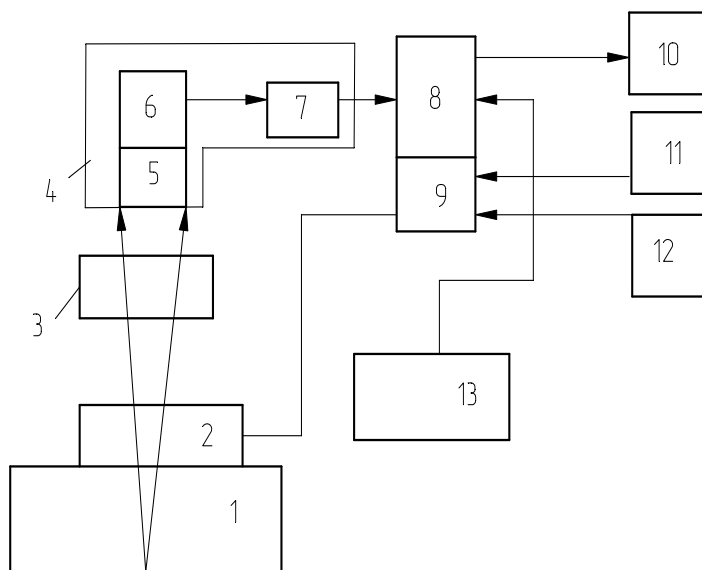
Рентгеновские и радионуклидные измерители широко используются для бесконтактного автоматического контроля толщины листового проката в производстве путем регистрации параметров прошедшего через материал излучения. Выбирая необходимое ускоряющее напряжение и ток рентгеновской трубки, с помощью рентгеновских толщиномеров можно осуществлять контроль, например, стального проката толщиной (0,002...25) мм, с погрешностью измерения 0,5 % от верхнего значения диапазона измерений. Радионуклидные источники, в основном

с бета-активностью, используются для измерения толщины стальной полосы в диапазоне от нескольких микрометров до 0,8 мм, а источники с гамма-активностью – для контроля горячего стального проката толщиной (3,5...40) мм. При контроле толщины алюминиевого проката верхнее значение диапазона увеличивается, а при контроле проката меди и сплавов на ее основе – уменьшается.

Системы, основанные на регистрации прошедшего через объект контроля излучения, можно условно разделить на две группы:

- прямого измерения параметров одного пучка излучения (абсолютный метод);
- непрерывного сравнения параметров двух пучков излучения (компенсационный метод).

В системах прямого измерения (рис. 5.2.3) стабилизация напряжения и тока трубки осуществляется с помощью микропроцессоров. В качестве детекторов используются ионизационные камеры и сцинтилляционные счетчики. Детектор с предусилителем, как правило, помещают в термостат для снижения влияния температуры окружающей среды.



*Рис. 5.2.3. Структурная схема толщиномера прямого измерения:
 1 – источник излучения; 2 – градуированный магазин стандартных образцов;
 3 – объект контроля (ОК) в виде полосы; 4 – охлаждающая рубашка;
 5 – сцинтилляционный кристалл; 6 – ФЭУ; 7 – предусилитель; 8 – электронный блок; 9 – процессор; 10 – индикатор отклонения толщины ОК; 11 – корректор толщины ОК; 12 – корректор химического состава ОК;
 13 – пульт управления толщиномера*

Измерители, работающие по методу сравнения двух потоков излучения, в зависимости от числа применяемых источников и приемников, могут быть трех видов: с одним источником излучения и двумя прием-

никами; с двумя источниками и одним приемником (рис. 5.2.4); с двумя источниками и двумя приемниками.

Калибровка толщиномеров в достаточно широком диапазоне значений толщины проката (0,2...12 мм) осуществляется путем разделения этого диапазона на отдельно калибруемые поддиапазоны. Скорость прокатки (контроля) горячекатаного листа в настоящее время может достигать значений 16 м/с, холоднокатаного – до 30 м/с.

Для проверки геометрии горячекатаного листа требуется измерение не только продольной разнотолщинности в процессе горячей прокатки, но и поперечной разнотолщинности. Для решения этой задачи применяют два способа. В первом используют два рентгеновских толщиномера, один из которых контролирует толщину ОК в виде полосы по центру, другой перемещается поперек полосы и контролирует полосу по синусоидальной кривой, определяемой скоростями движения полосы и перемещения прибора. Разность показаний центрального и перемещающегося толщиномеров характеризует поперечный профиль полосы по толщине.

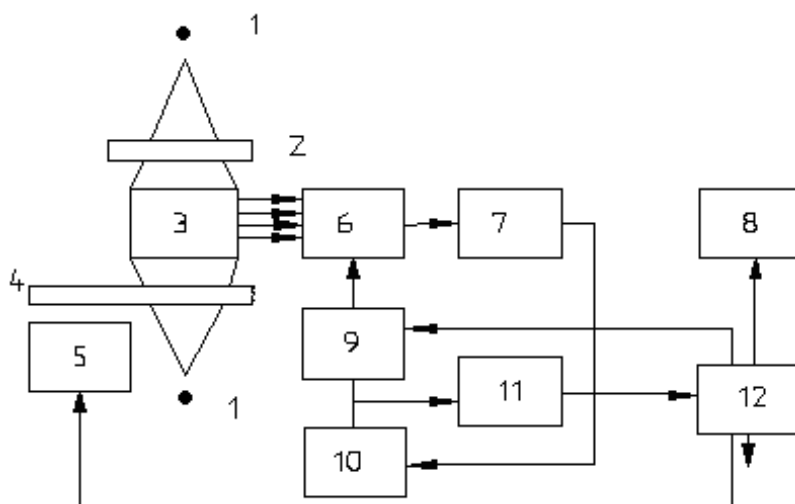


Рис. 5.2.4. Структурная схема толщиномера, работающего по методу сравнения двух потоков излучения:

- 1 – источник излучения; 2 – образцы толщины; 3 – приемник (сцинтилляционный кристалл); 4 – ОК в виде полосы; 5 – подвижный образец толщины; 6 – ФЭУ; 7 – усилитель; 8 – показывающий прибор; 9 – блок питания; 10 – регулятор тока ФЭУ; 11 – блок обработки сигнала; 12 – контроллер

Недостатком этого способа является то, что измерение происходит в двух разных сечениях полосы и, следовательно, на результате сказывается неодинаковое геометрическое положение полосы относительно потоков излучения. К юстировке толщиномеров предъявляются высокие требования. Так, наклон полосы свыше 3° приводит к дополнительной погрешности измерения толщины.

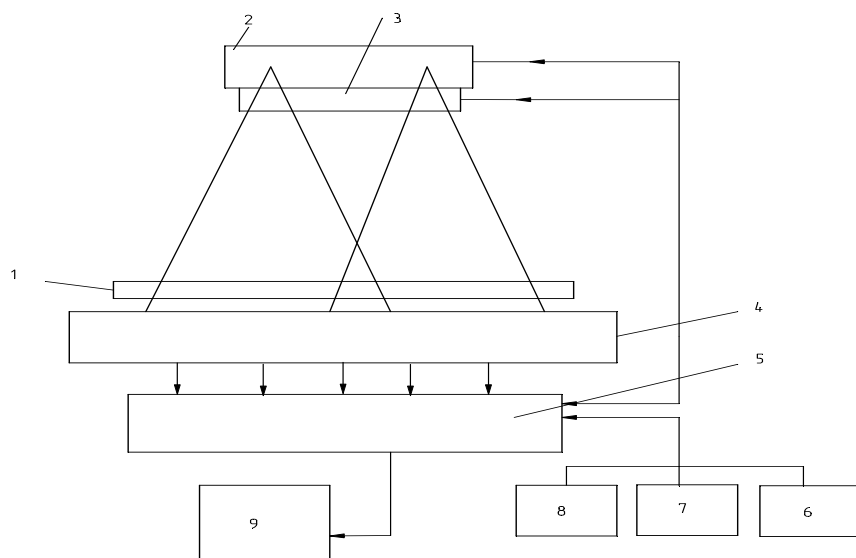


Рис. 5.2.5. Структурная схема измерителя профиля ОК в виде полосы:
 1 – ОК; 2 – блок с двумя источниками излучения; 3 – магазин стандартных эталонов; 4 – блок детекторов; 5 – микропроцессор;
 6 – пульт задания химсостава ОК; 7 – пульт задания толщины ОК;
 8 – пульт задания температуры; 9 – дисплей

Во втором способе используется один прибор, измеряющий профиль объекта в виде полосы в одном сечении (рис. 5.2.5).

5.2.4. Описание прибора-радиометра

Назначение прибора – радиометра-Б4

Радиометр Б-4 предназначен для счета и регистрации импульсов от низковольтных газовых счетчиков. Прибор может применяться для счета от любых датчиков периодических импульсов и синусоидального напряжения, имеющих параметры, указанные ниже. При использовании отдельного источника высокого напряжения возможна работа с высоковольтными счетчиками.

Технические данные

Чувствительность пересчетного прибора ПП-16 к импульсам положительной и отрицательной полярности при длительности переднего фронта не более 1 мкс. не хуже 1 В при положении переключателя «Вход» 1:1 и не хуже 5 В при положении переключателя «Вход» 1:5.

При изменении длительности фронта входных импульсов до 10 мкс чувствительность может ухудшиться до 3 В в положении «Вход» 1:1 и до 10 В в положении «Вход» 1:5.

Длительность входных импульсов, поступающих на прибор ПП-16, может изменяться в пределах от 1 мкс до 200 мкс. Максимальная ам-

плитуда входного сигнала, как для положительных, так и для отрицательных импульсов, не должна превышать:

- в положении «Вход» 1:1 – 5 В;
- в положении «Вход» 1:5 – 25 В.

Чувствительность к импульсам противоположной полярности меняется в зависимости от скважности и длительности входных импульсов.

- В положении «Вход» 1:1, при скважности не менее 5 и длительности входных импульсов до 50 мкс, чувствительность к импульсам противоположной полярности в 5 раз хуже чувствительности к импульсам основной полярности и в 2–3 раза при длительности входных импульсов от 50 до 100 мкс.

- В положении «Вход» 1:5, при длительности входных импульсов до 10 мкс чувствительность к импульсам противоположной полярности в 5 раз хуже чувствительности к импульсам основной полярности и в 2–3 раза хуже при длительности импульсов до 100 мкс.

Чувствительность прибора к синусоидальному напряжению в диапазоне частот от 30 до 15000 Гц в положении «Вход» 1:1 – не хуже 1,5 В, положении «Вход» 1:5 – не хуже 5 В.

Разрешающее время прибора ПП-16 по двойным импульсам не хуже 70 мкс.

Максимальная скорость счета периодических импульсов не ниже 15000 имп/с.

Минимальная частота счета синусоидального напряжения – 30 Гц.

Емкость счета 10^6 – 1 импульс. Система счета десятичная с прямым отсчетом показаний.

В приборе предусмотрено стабилизированное напряжение $+(390 \pm 20)$ В для питания низковольтных газовых счетчиков при среднем токе нагрузки не более 25 мкА.

Электрические параметры установки гарантируются после трехминутного прогрева.

Предусмотрена возможность поочередной работы двух пересчетных приборов ПП-16.

Минимальное входное сопротивление прибора ПП-16 не менее 1 кОм.

Установка рассчитана на питание от сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением $220 \text{ В} \pm 10 \%$. Потребляемая мощность не более 30 Вт.

Установка рассчитана на восьмичасовую непрерывную работу в нормальных лабораторных условиях и при номинальном напряжении сети. Прибор сохраняет работоспособность в интервале температур от +10 до +35 °С при относительной влажности до 80 % (при температуре +20 °С).

5.2.5. Принцип работы счетчика

Счетчик представляет собой газоразрядный промежуток с сильно неоднородным электрическим полем. Чаще всего применяются счетчики с коаксиально расположенными цилиндрическими электродами: внешний цилиндр – катод и тонкая нить, натянутая на его оси – анод. Внутренний, или собирающий, электрод (анод) представляет собой тонкую прямую проволоку диаметром примерно 0,1 мм, оба конца которой укреплены на изоляторах. Этот электрод обычно изготавливают из вольфрама, позволяющего получить прочную и однородную проволоку малого диаметра. Другой электрод (катод) составляет обычно часть оболочки счетной трубки. Если стенки трубки стеклянные, то ее внутреннюю поверхность покрывают проводящим слоем (медь, вольфрам, сталь, нихром и т. д.).

Электроды располагаются в герметически замкнутом резервуаре, наполненном каким-либо газом (гелий, аргон и др.) до давления от нескольких сантиметров до десятков сантиметров ртутного столба. Газы, используемые для наполнения счетчиков, должны обладать достаточно малым коэффициентом прилипания электронов, т. е. чтобы перенос отрицательных зарядов в счетчике осуществлялся свободными электронами.

Для регистрации частиц, обладающих малым пробегом (альфа-частицы, электроны), в резервуаре счетчика делается окно, через которое частицы попадают в рабочий объем.

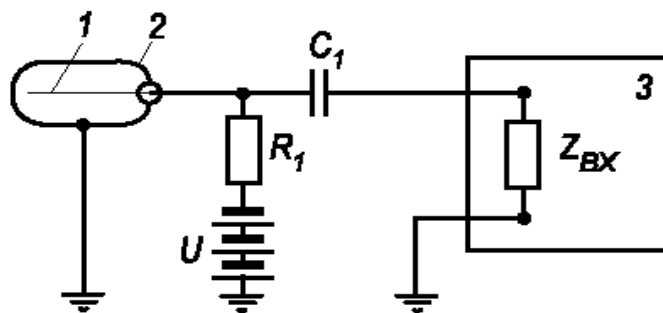


Рис. 5.2.6. Схема включения импульсного газонаполненного детектора:
1 – анод; 2 – катод; 3 – регистрирующее устройство

Схема включения счетчика показана на рис. 5.2.6. Напряжение между собирающим электродом и катодом счетчика подается от высоковольтного источника питания. Приведенная схема имеет то преимущество, что катод счетчика поддерживается под потенциалом земли. Собирающий электрод имеет высокий положительный потенциал относительно земли. Конденсатор C_1 разделяет высоковольтную цепь питания счетчика и входную цепь электронной схемы. Сопротивление R_1 , вклю-

ченное последовательно с источником питания, отделяет собирающий электрод от источника питания. Благодаря этому сопротивлению потенциал нити во время разряда снижается. Величина сопротивления ($R \sim 10^8 \dots 10^9$ Ом) подбирается таким образом, чтобы можно было поддерживать пониженное напряжение на аноде до тех пор, пока положительные ионы не дойдут до катода и нейтрализуются на нем.

Счетная характеристика дает зависимость скорости счета от приложенного напряжения при неизменной интенсивности ионизирующего излучения (рис. 5.2.7). Для правильно выбранных рабочих условий эта картина имеет горизонтальный участок, называемый «плато», протяженностью в несколько сот вольт с небольшим наклоном (обычно несколько процентов на 100 В). Напряжение начала счета (порог счета) соответствует минимальным амплитудам импульсов, пропускаемых дискриминатором регистрирующего устройства. Значение этого напряжения зависит от многих причин, главными из которых являются диаметр нити анода, род газов, входящих в состав смеси, давление газа. На начальном участке счетной характеристики быстрый рост числа импульсов объясняется тем, что счетчик работает в области ограниченной пропорциональности, где возникновение разряда в счетчике зависит от числа первоначально образованных пар ионов.

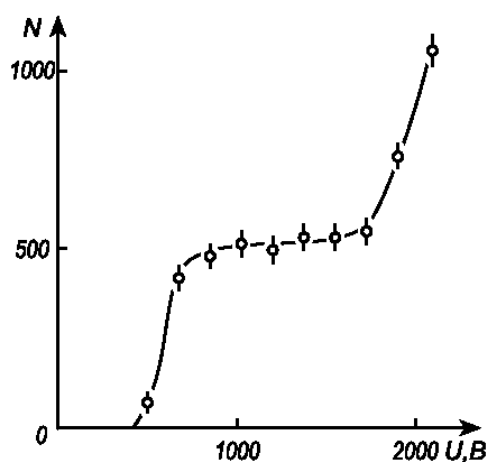


Рис. 5.2.7. Счетная характеристика счетчика Гейгера–Мюллера

Начиная с некоторого напряжения, скорость счета практически не зависит от приложенного напряжения, так как здесь каждая ионизирующая частица вызывает импульс с достаточной для регистрации амплитудой (для вспышки разряда достаточно одной пары ионов). Скорость счета здесь определяется числом актов ионизации, происходящих в рабочем объеме счетчика.

Количественно правильная регистрация излучения, очевидно, может производиться только со счетчиками, имеющими плато.

Наличие плато выясняется путем снятия счетной характеристики счетчика. Полученная счетная характеристика позволяет судить о значении величины рабочего напряжения конкретного счетчика, протяженности и наклоне плато.

Рабочее напряжение, протяженность и наклон плато зависят от природы газа, наполняющего счетчик, а для данного газа – от его давления и конструкции счетчика (диаметр катода, толщина нити анода). При повышении давления газа рабочее напряжение, как правило, увеличивается. Рабочее напряжение галогенных счетчиков равно, обычно, (300...400) В, а для счетчиков, не имеющих галогенной добавки, оно составляет 800 В и выше. Рабочее напряжение выбирается в середине плато. Причинами наклона плато является наличие вторичных электронов, создающих ложные импульсы, и изменение чувствительного объема счетчика с ростом напряжения.

Механизм разряда в несамогасящемся счетчике Гейгера–Мюллера

При появлении в рабочем объеме счетчика ионов и электронов, они начинают двигаться под действием электрического поля к электродам. Электроны, двигаясь к нити, попадают в область с большой напряженностью электрического поля, где они приобретают скорости, достаточные для возбуждения и ударной ионизации атомов газа, с которыми они сталкиваются.

Каждый электрон на своем пути к аноду создает некоторое количество пар ионов и возбужденных атомов. Если каждый электрон создает лавину из m электронов (в среднем), то при начальном числе пар n ионов первая лавина, приходящая на анод счетчика, состоит уже из nm электронов. В то же время возбужденные атомы и молекулы газа высвечиваются, испуская фотоны (ультрафиолетовое излучение). Если каждый электрон на своем пути к аноду создаст μ возбужденных атомов газа, то будет испущено $n\mu$ фотонов. Некоторая доля ν этих фотонов попадет на катод счетчика и вырвет с его поверхности фотоэлектроны. Число вырванных с поверхности катода электронов в среднем равно $n\nu\mu = na$. Эти электроны, двигаясь от катода к аноду, создают вторую лавину из nam электронов, а из катода вырывается фотонами новая партия из na^2 электронов и т. д. Через разрядный промежуток счетчика проходит последовательная серия электронных лавин:

$$N = nm + anm + a^2nm + \dots = nm(1 + a + a^2 + \dots) \quad (14)$$

Положительные ионы также могут вырывать с поверхности катода электроны.

В гейгеровской области $a > 1$, и ток электронов, протекающий через счетчик, сразу же после возникновения первичной ионизации начинает возрастать по экспоненциальному закону:

$$i = i_0 \exp(\tau / T), \quad (15)$$

где τ – время движения электронов от катода к аноду ($\tau \sim (10^{-8} \dots 10^{-7})$ с).

Так как положительные ионы в объеме счетчика (число их равно числу электронов) движутся значительно медленнее электронов, в разрядном промежутке быстро образуется большой положительный объемный заряд. Распределение поля между анодом и катодом изменяется и коэффициенты n и μ уменьшаются, так что a делается приблизительно равным или меньше единицы.

Возрастание тока в счетчике прекращается. Он достигает своего максимального значения:

$$i = (U - U_z) / R_c, \quad (16)$$

где U_z – начальный потенциал зажигания газового разряда (для несамогасящихся счетчиков среднего размера $U_z = (500 \dots 1000)$ В; R_c – внутреннее сопротивление газоразрядного промежутка, зависящее от величины счетчика, отношения диаметров анода и катода, сорта газа и давления ($R_c \sim 10^6 \dots 10^7$ Ом).

Такой счетчик, очевидно, не пригоден для работы, так как способен зарегистрировать только одну частицу. Необходимо принять специальные меры для гашения разряда, для того, чтобы счетчик мог регистрировать другие попадающие в счетчик частицы.

Время, в течение которого счетчик вообще не регистрирует частицы, попадающие в него (не реагирует на ионизирующие частицы), называется мертвым временем.

Интервал времени после «мертвого времени» и до полного восстановления первоначальных характеристик, называется временем восстановления.

Минимальный промежуток времени между двумя следующими друг за другом частицами, когда они регистрируются отдельно, называется временем разрешения.

5.2.6. Порядок работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и описанием установки.
2. Прогреть установку.
3. Определить скорость счета фона со статистической погрешностью не хуже 1 %.
4. Снять зависимость скорости счета от толщины поглотителя. Статистическая погрешность изменения скорости счета должна быть не хуже 5 %.

5. По зависимости $f(d) = |\ln|(n_0k - n_\phi)/(nk - n_\phi)|$ графическим методом определить значения линейных коэффициентов ослабления, $\mu \cdot d$.
6. Сделать выводы.
7. Ответить на контрольные вопросы.
8. Составить отчет.

5.2.7. Дополнительные указания

1. Результаты измерений рекомендуется заносить в таблицу:

№ измерен.	Толщина поглотителя, мм	Время измерения, с	Число зарегистрированных импульсов, (имп.)	Скорость счета, (имп/мин)	Поправка на мертвое время

2. Поправку на мертвое время определять по формуле:

$$k = 1 / (1 - n\tau), \quad (17)$$

где $\tau = 3 \cdot 10^{-6}$ мин, а $n = n_i / (1 - n_i \cdot \tau)$.

5.2.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание принципа работы толщиномера и плотномера.
3. Описание устройства измерения (радиометра-Б4).
4. Порядок выполнения работы.
5. Результаты измерений и их обработка.
6. Выводы по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

5.2.9. Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип измерения толщины и плотности.
2. Объяснить принцип работы счетчика Гейгера–Мюллера.

ГЛАВА 6. РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

6.1. Измерение параметров рентгеновских изображений с помощью микрофотометра ИФО-451

6.1.1. Цель работы

Измерение параметров рентгенографических изображений с помощью микрофотометра ИФО-451.

6.1.2. Назначение прибора ИФО-451

Двухлучевой регистрирующий микрофотометр ИФО-451 предназначен для регистрации плотностей почернения фотографических эмульсий спектрограмм, рентгенограмм, электронограмм на фотографических пластинках или пленках.

Одновременно на экране прибора можно наблюдать исследуемый участок объекта, увеличенный в 20 раз.

6.1.3. Основные технические характеристики

Пределы измерения плотности почернения, единиц плотности: с клином «1,2» $0-1,2 \pm 0,1$; с клином «1,8» $0-1,8 \pm 0,1$; с клином «2,5» $0-2,5 \pm 0,2$.

Погрешность измерения плотности почернения, единиц плотности: в пределах от 0 до 1,8 ед. пл. $\pm 0,01$; в пределах от 1,8 до 2,5 ед. пл. $\pm 0,02$.

Увеличение при проецировании на экран $20\times$.

Пределы раскрытия измерительной щели, мм: по ширине 0–4; по высоте 0–18.

Цена деления маховичка установки измерительной щели, мм: по ширине 0,01; по высоте 0,02.

Пределы перемещения предметного стола, мм: в продольном направлении 240; в поперечном направлении 100; продольное микрометрическое 25; с ценой деления маховичка 0,01; разворот вокруг оптической оси $\pm 23^\circ$.

Масштабы регистрации – 1:1; 2:1; 5:1; 10:1; 20:1; 50:1; 100:1; 200:1; 300:1.

Скорость движения стола самописца, мм/мин: от 0 до 200.

Размер экрана, мм 110×126 .

Максимальный размер фотометрируемых пластинок, см: 9×24 .

Размер бланка регистрограммы, мм: 230×300 .

Источник света – лампа накаливания СЦ-61.

Приемник света – ФЭУ-17А.

Питание прибора – от сети переменного тока: напряжение, В, 220_{-11}^{+22} ; частота, Гц, 50.

Потребляемая мощность прибора, Вт, 160.

Габаритные размеры, мм, не более: длина 900; ширина 700; высота 480.

Масса, кг, не более 85.

6.1.4. Устройство микрофотометра ИФО-451

Принцип работы двухлучевого регистрирующего микрофотометра основан на сравнении светового потока Φ_1 , прошедшего через измеряемый объект, со световым потоком Φ_2 эталонной оптической ветви.

На рис. 6.1.1 представлена принципиальная схема микрофотометра, работающего на принципе поочередного сравнения световых потоков. В этой схеме использован общий источник света 1 и общий приемник света 6 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ.

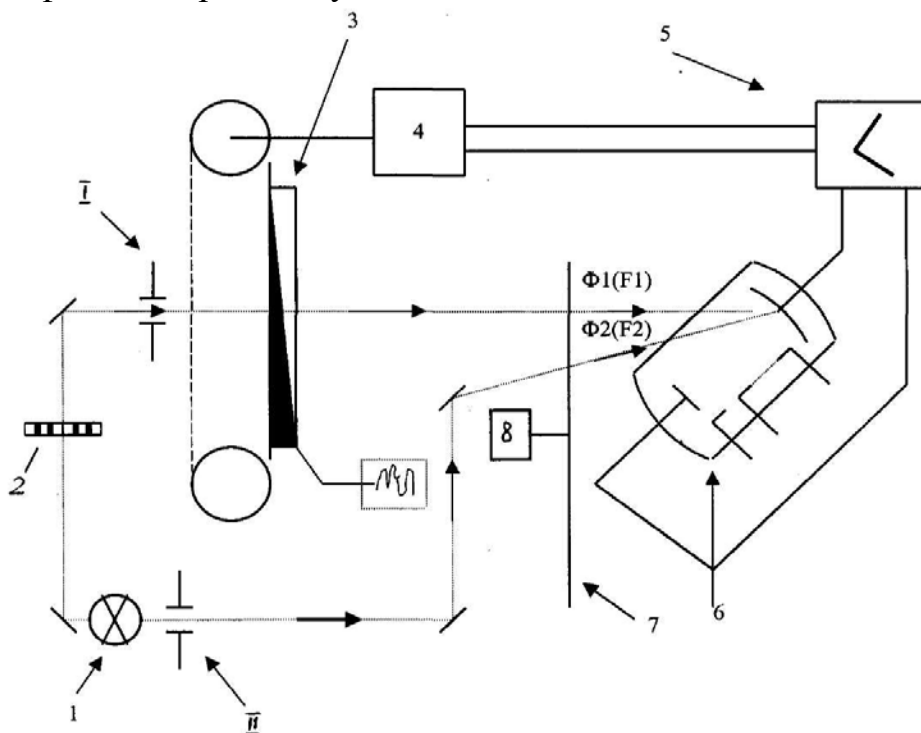


Рис. 6.1.1. Принципиальная схема микрофотометра:

1 – общий источник света; 2 – измерительный объект; 3 – фотометрический клин;

4 – серводвигатель; 5 – усилитель переменного тока; 6 – фотоприемник;

7 – диск модулятора; 8 – электродвигатель; I – ветвь измерительная;

II – ветвь сравнения

Сравниваемые потоки Φ_1 и Φ_2 поочередно проходят через секторообразные вырезы в диске 7 модулятора (обтюратора), который вращается от электродвигателя 8, и попадают на фотоприемник ФЭУ. Если оба

потока одинаковы, то на приемник поступает как бы непрерывный световой поток постоянной величины. Если световые потоки Φ_1 и Φ_2 не равны, то в анодной цепи ФЭУ появится пульсирующий ток.

К фотоэлектронному умножителю подключается усилитель 5 переменного тока, настроенный на частоту модуляции световых пучков, который усиливает только переменную составляющую. Сигнал обработки поступает на управляющую обмотку серводвигателя 4, приводящего в движение фотометрический клин 3. В данном приборе фотометрический клин выполнен линейным по плотности. Кинематически он связан с пером самописца. Следовательно, перемещение пера будет пропорционально исследуемой оптической плотности.

Обработка происходит до выполнения условия: $\Phi_1 = \Phi_2$.

Щель измерительная ограничивает размеры фотометрируемого участка объекта.

Щель сравнения – для приведения схемы к нулю перед началом работы на приборе.

В комплект прибора входят три фотометрических клина, предназначенные для работы в трех пределах измерения плотностей почернения.

6.1.5. Правила эксплуатации микрофотометра ИФО-451

Размещение и монтаж

Прибор должен работать в сухом помещении, в стороне от нагревательных устройств.

Прибор необходимо предохранять от сотрясений, вибрации, которые мешают работе. Не допускается попадание прямого света на экран.

Подготовка к работе

Прибор заземлите через клемму заземления 5 (см. рис. 6.1.5) на нижнем корпусе.

Маховички 4 щели сравнения (см. рис. 6.1.4) и измерительной щели 15 (см. рис. 6.1.3) установите на ноль.

Подсоедините прибор к сети переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц через колодку 6 (см. рис. 6.1.5) и включите общий выключатель 11 (см. рис. 6.1.3).

Включите выключатель 8 усилителя. Время прогрева усилителя 15 минут.

Проверьте, как установлена лампа СЦ-61. Вывинтите осветительный объектив и на срез втулки положите листок белой тонкой бумаги, на которой должно получиться изображение нити лампы. При этом втулка должна быть сцентрирована относительно оптической оси.

Изображение нити лампы должно быть резким и симметричным относительно втулки, в которую вворачивается осветительный объектив. В ином случае снимите крышку 2 (см. рис. 6.1.4), поворотом установочных винтов на фонаре 6 (см. рис. 6.1.2) добейтесь нужного положения нити лампы.

Поставьте осветительный объектив на место.

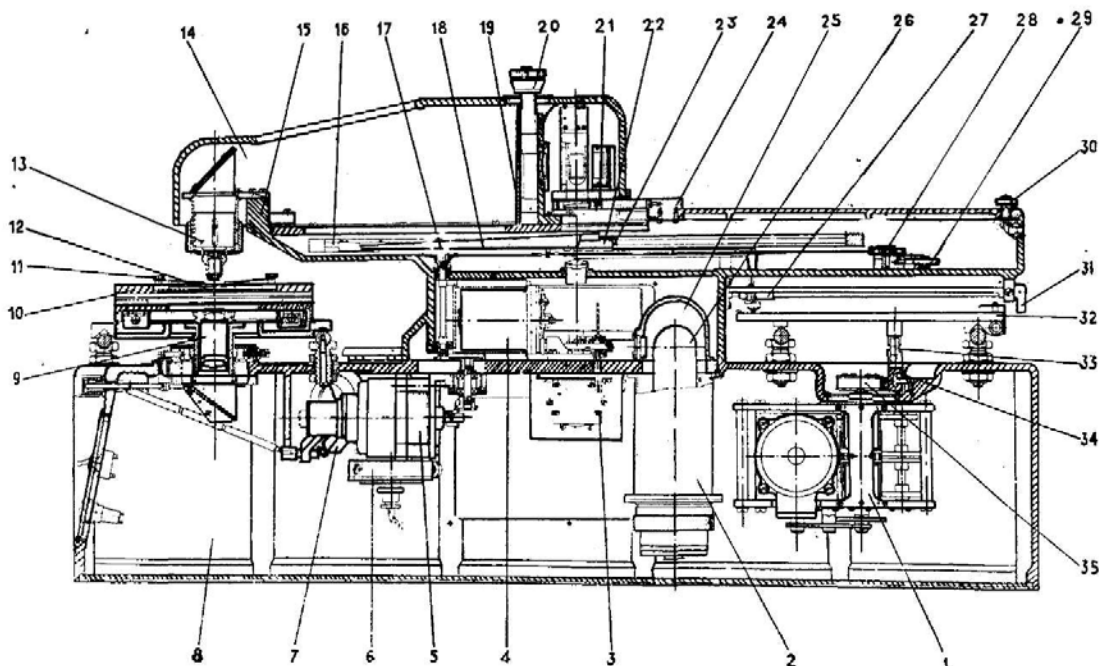


Рис. 6.1.2. Продольный разрез прибора:

- 1 – коробка скоростей; 2 – нижний кожух ФЭУ; 3 – обтюратор;
 4 – привод модулятора; 5 – серводвигатель; 6 – фонарь; 7 – осветительная щель;
 8 – корпус нижний; 9 – осветительный объектив; 10 – предметный стол;
 11 – клемма; 12 – покровные стекла; 13 – тубус с микрообъективом; 14 – кожух;
 15 – корпус верхний; 16 – направляющие; 17 – шкив; 18 – клин фотометрический;
 19 – экран; 20 – щель измерительная; 21 – подклин; 22 – каретка; 23 – защелка;
 24 – крышка; 25 – верхний кожух ФЭУ; 26 – ФЭУ; 27 – каретка с пером самописца;
 28 – шкив; 29 – винт; 30 – маховичок; 31 – рукоятка; 32 – стол самописца;
 33 – поводок; 34 – каретка; 35 – шкив

Установка масштаба записи

Требуемый масштаб устанавливают на масштабном рычаге 1 (см. рис. 6.1.5). Для этого снимите его с прибора, выньте штифт с гайкой 10.

После этого каретка легко перемещается вдоль рычага и штифтом ее можно зафиксировать в любом из девяти масштабов. В случае необходимости каретку можно дополнительно закрепить двумя винтами. Установите ось каретки в соответствующее отверстие планки 9 и совместите шарикоподшипники рычага с поводком 2 и поводком линейки 12.

Выбор скорости движения регистрограммы

Для приближенного определения необходимой скорости регистрации используют формулу:

$$V = \frac{60 \cdot M \cdot B}{\Gamma \cdot t} \text{ мм/мин,} \quad (1)$$

где V – скорость регистрации; M – масштаб, установленный на масштабном рычаге; B – ширина измерительной щели в мм; Γ – увеличение микробъектива; t – время пробега пером самописца всей шкалы (1/с).

При этом условно принимается, что характеристика распределения плотности почернения по ширине, например, спектральной линии, имеет прямоугольную форму.

Неправильный выбор скорости, масштаба и ширины измерительной щели может привести к неверным результатам.

Не рекомендуется работать на микрофотометре со скоростью 200 мм/мин при масштабе регистрации 1:1.

Выбор размера измерительной щели

Зернистость фотоэмульсии влияет на результат регистрации. Ошибка будет тем больше, чем меньше регистрируемая площадь объекта и чем крупнее зерна фотоэмульсии. Из этого следует, что фотометрируемая площадь должна быть по возможности большей.

Значение используемой при фотометрировании площади A установить по размерам измерительной щели с учетом увеличения по формуле:

$$A = \frac{H \cdot B}{\Gamma^2}, \quad (2)$$

где H – высота щели; B – ширина щели; Γ – увеличение прибора (20^\times).

Установка исследуемого объекта на приборе и измерение его относительной оптической плотности

Исследуемый объект, например, фотографическую пластину с проявленной на ней спектрограммой, устанавливают на предметный стол и прижимают клеммами 11 (см. рис. 6.1.2).

В зависимости от характера исследуемого объекта выбирают фотометрический клин 18 с соответствующим ему подклином 21. Чтобы их установить, отверните маховичок 30, снимите крышку 24, выведите каретку 22 и закрепите на ней фотометрический клин таким образом, чтобы наибольшая его оптическая плотность была расположена к щелчке 23.

Перед установкой крышки в паз кожуха 14 введите подклин.

Затем тубусом с микробъективом 13 (см. рис. 6.1.2) изображение исследуемого объекта фокусируют на центральную часть экрана 19.

Фокусируется осветительная щель на экран маховичком 17 (см. рис. 6.1.3). Маховичком 12 устанавливается ее ширина, а маховичками 13 и 16 – положение ее на экране.

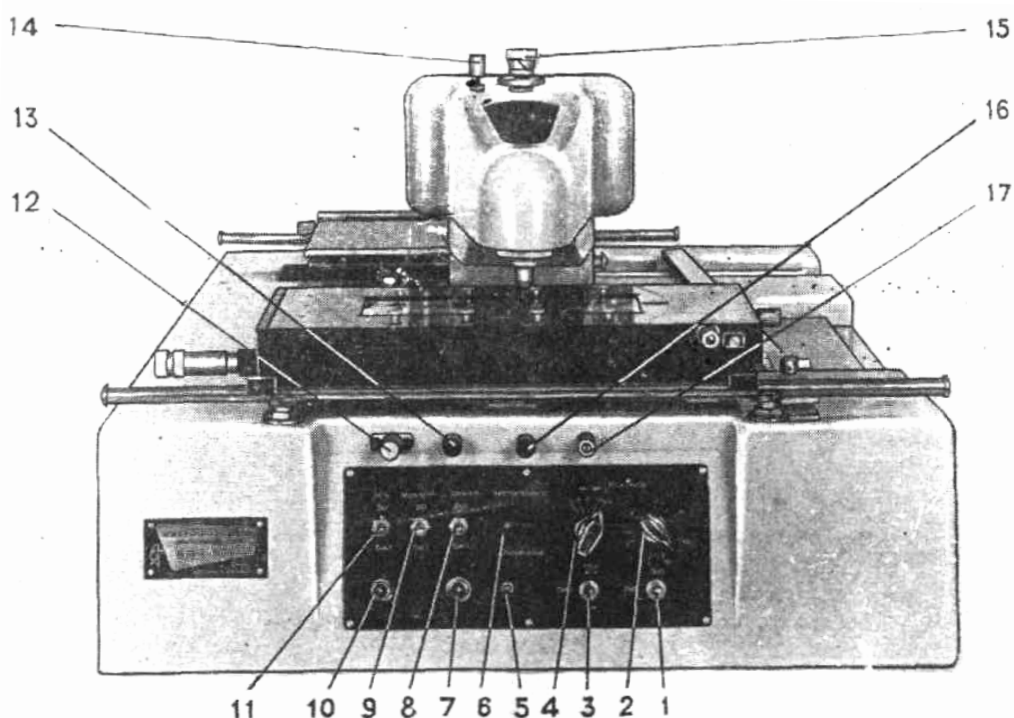


Рис. 6.1.3. Микрофотометр (вид со стороны пульта управления):
 1 – переключатель пера самописца; 2 – маховичок плавного изменения скорости; 3 – переключатель движения стола самописца; 4 – рукоятка переключения скоростей; 5 – резистор демпфирования; 6 – резистор чувствительности; 7 – сигнальная лампа; 8 – выключатель усилителя; 9 – выключатель модулятора; 10 – сигнальная лампа; 11 – общий выключатель; 12 – маховичок раскрытия осветительной щели; 13 – маховичок поперечного перемещения осветительной щели; 14 – маховичок раскрытия измерительной щели по высоте; 15 – маховичок раскрытия измерительной щели по ширине; 16 – маховичок продольного перемещения осветительной щели; 17 – маховичок фокусировки

Далее вращением маховичка 16 (см. рис. 6.1.5) установите изображение исследуемых спектральных линий параллельно измерительной щели 20 (см. рис. 6.1.2), которая расположена за прямоугольным вырезом в центральной части экрана. После этого выберите нужный размер измерительной щели и на нее выведите экспонированный участок.

На пульте управления включите выключатель «Модулятор», переключатель «Перо» и приступите к установке каретки 27 с пером самописца в нулевое положение. Для этого маховичком 4 (см. рис. 6.1.4) откройте щель сравнения настолько, чтобы перо самописца оставалось у нижнего края регистрограммы, не доходя до упора 5...10 мм.

Необходимая чувствительность прибора достигается поворотом оси *б* (см. рис. 6.1.3) резистора R41, которая выведена на пульт управления. На пульт управления выведена также ось другого резистора: R48 – резистора демпфирования 5. Оси этих резисторов имеют шлицы под отвертку.

Перед регулировкой оба резистора поверните против часовой стрелки в крайнее положение. Затем, перекрывая фотометрическую ветвь и плавно поворачивая по часовой стрелке ось резистора *б*, добейтесь необходимой подвижности пера самописца (перекрывать следует перед микрообъективом листом непрозрачной бумаги или рукой в вырезе кожуха). После этого, плавно поворачивая ось демпфирования и одновременно корректируя положение оси резистора чувствительности, добейтесь желаемого переходного процесса (с минимальным проскакиванием пера через нулевое положение).

При регулировке имейте в виду, что чрезмерное демпфирование ведет к увеличению времени пробега пера.

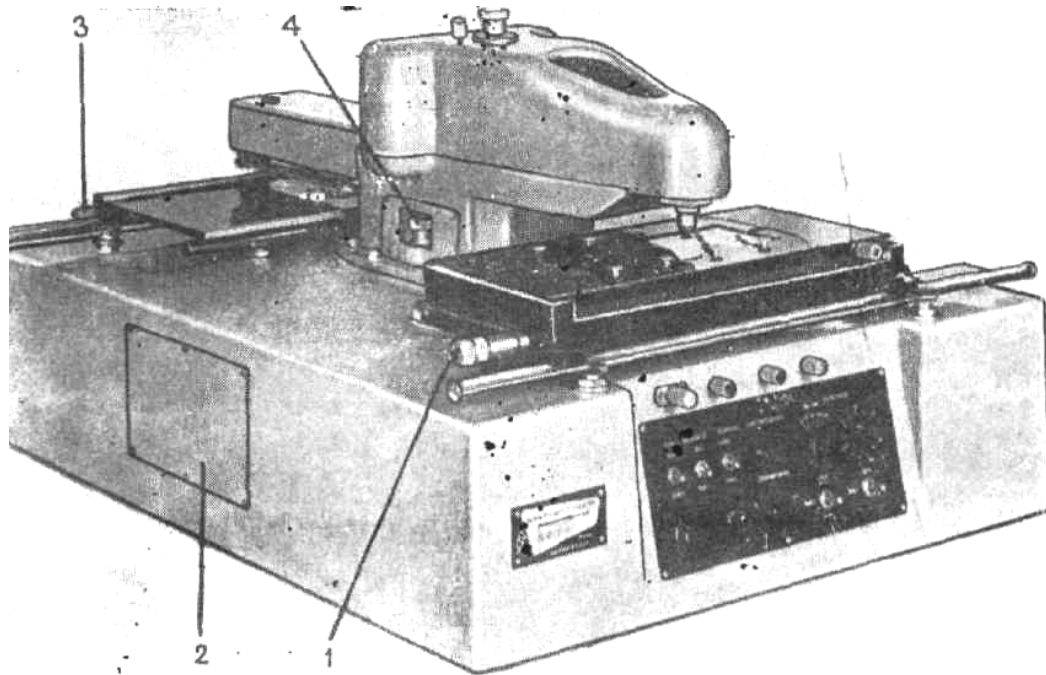
Отрегулированным и готовым к работе можно считать такое состояние прибора, когда перо в нулевом положении несколько дрожит. Тогда при перекрытии фотометрической ветви каретка с пером самописца должна переместиться в верхнюю часть регистрограммы примерно за 1 с, а при резком открытии перо должно за такое же время вернуться обратно, перейти нулевое положение и тут же возвратиться к нему.

Если при отсутствии заслонки перо будет находиться в верхней части регистрограммы, а при перекрытии фотометрической ветви начнет перемещаться вниз, переведите переключатель пера самописца на пульте управления в другое крайнее положение.

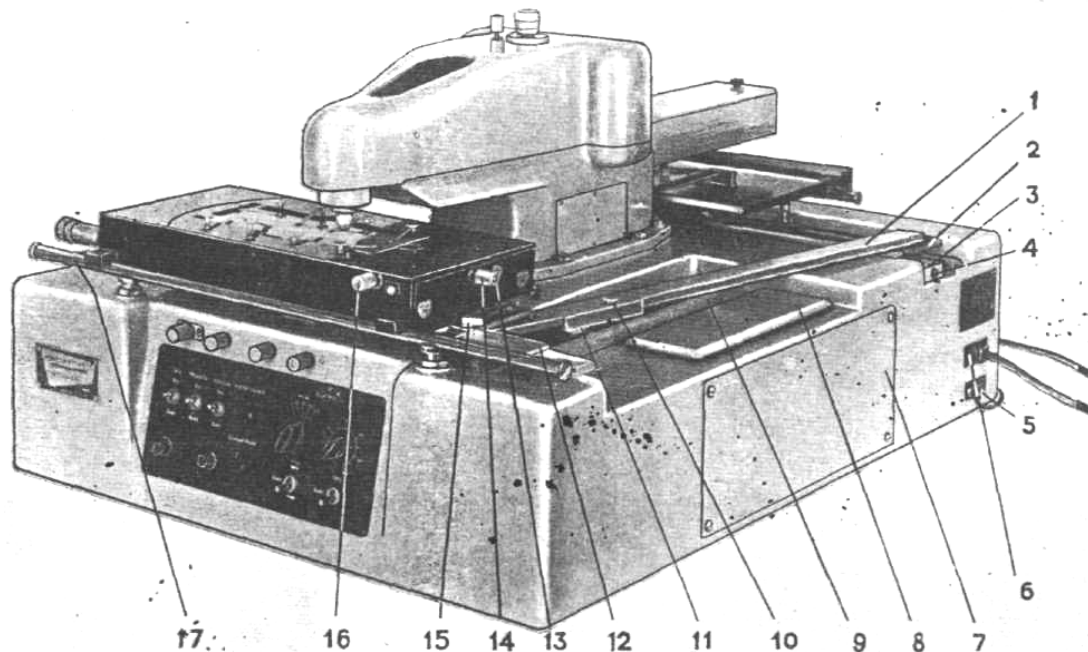
Затем закрепите бланк регистрограммы на столе самописца 32 (см. рис. 6.1.2), рукояткой 31 опустите перо, включите переключатель 3 (см. рис. 6.1.3) движения стола самописца и запишите нулевое положение пера. Подняв перо, верните стол самописца в исходное положение, подведите исследуемую область спектрограммы к измерительной щели, опустите перо и произведите необходимую запись.

При прохождении спектральных линий через измерительную щель будет происходить запись, а удаление пера от нулевого положения будет тем больше, чем больше оптическая плотность исследуемого участка спектрограммы.

Об оптической плотности исследуемого объекта можно судить, только зная характеристику того фотометрического клина, который установлен в приборе (характеристикой является приращение оптической плотности на 10 мм длины клина). Кроме того, учитывайте отклонение оптической плотности по всей длине фотометрического клина от линейности.



*Рис. 6.1.4. Микрофотометр (вид с левой стороны):
1 – микрометрический винт; 2 – крышка; 3 – маховичок прижимной планки стола самописца; 4 – маховичок щели сравнения*



*Рис. 6.1.5. Микрофотометр (вид с правой стороны):
1 – рычаг масштабный; 2 – поводок; 3 – шкив; 4 – винт регулировочный;
5 – клемма заземления; 6 – колодка; 7 – электронный усилитель; 8 – крышка;
9 – планка; 10 – штифт с гайкой; 11 – каретка; 12 – линейка с поводком;
13 – винт; 14 – маховичок поперечного перемещения стола; 15 – рукоятка зажима
линейки; 16 – маховичок разворота стола; 17 – направляющая*

6.1.6. Связь оптической плотности почернения с параметрами излучения

Под воздействием ионизирующего излучения в пленке происходят фотохимические реакции, и при проявлении это обуславливает потемнение пленки – ее оптическую плотность почернения (оптическая плотность). Оптическая плотность снимка $D_{\text{опт}}$ – это величина, равная десятичному логарифму непрозрачности пленки. Прозрачность пленки характеризует ослабление проходящего через нее светового потока и численно равна отношению светового потока, падающего на пленку, к потоку, проходящему через нее. Оптическая плотность на линейном участке характеристической кривой (рис. 6.1.6) пропорциональна логарифму экспозиционной дозы излучения и выражается уравнением:

$$D_{\text{опт}} = \gamma \lg P \cdot t + k, \quad (3)$$

где γ – наклон прямолинейного участка характеристической кривой при плотности $D_{\text{опт}}$, или коэффициент контрастности пленки; P – мощность экспозиционной дозы излучения; t – время воздействия излучения; k – постоянная.

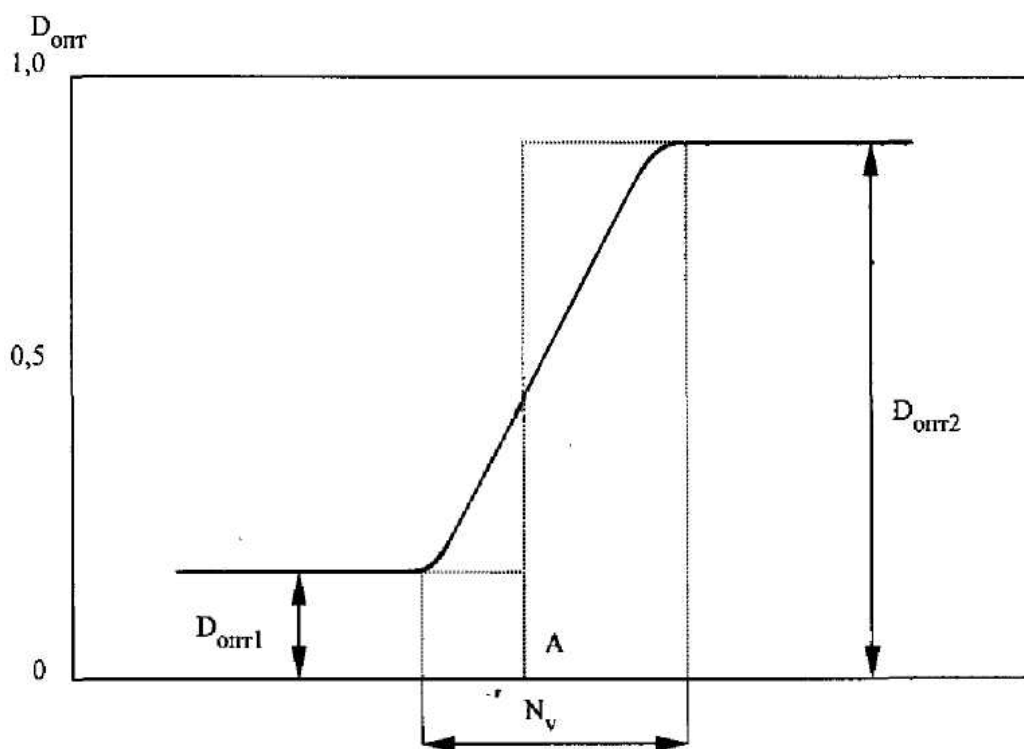


Рис. 6.1.6. Характеристическая кривая:
 N_v – собственная нерезкость; $D_{\text{опт}1}$ – меньшее почернение;
 $D_{\text{опт}2}$ – большее почернение

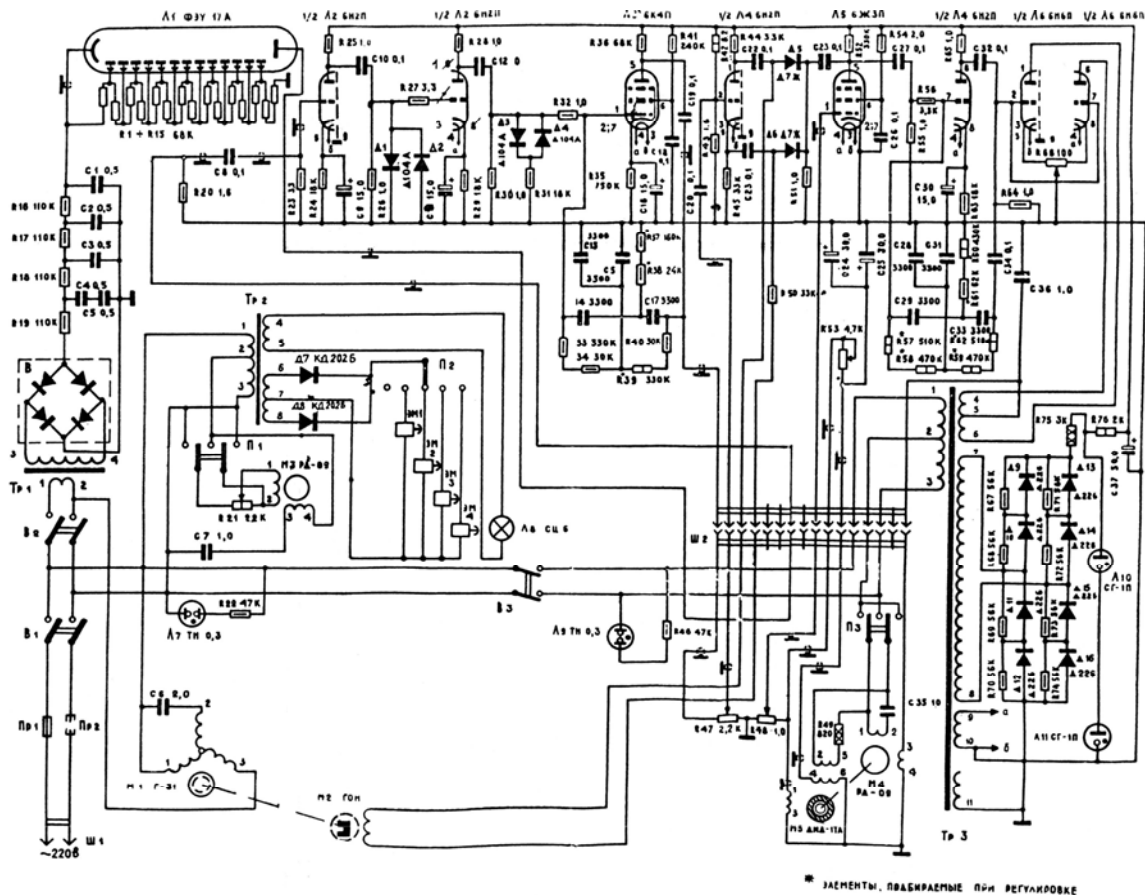


Рис. 6.1.7. Принципиальная электрическая схема ИФО-451

6.1.7. Методы определения нерезкости изображения по микрофотограмме нерезкого края

Нерезкость изображения определяется по микрофотограмме нерезкого края на уровне 0,16 и 0,84 от D_{\max} . Это соответствует вероятности обнаружения $P = 0,99$.

6.1.8. Задание

1. Измерить по рентгенограммам, выданным преподавателем, размеры поперечного сечения пучка и построить график распределения интенсивности излучения по сечению пучка.
2. Получить микрофотограмму изображения резкого края и определить нерезкость изображения.

6.1.9. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Устройство прибора (структурная схема).
3. Программа и порядок выполнения лабораторной работы.
4. Результаты измерений (график и т. д.).

5. Выводы по работе.
6. Ответы на контрольные вопросы.

6.1.10. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы микрофотометра ИФО-451?
2. Как влияет на результат регистрации зернистость фотоэмульсии?
3. К чему ведет чрезмерное демпфирование?
4. Для чего служит щель сравнения?

Список использованных источников

1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации «Микрофотометра ИФО-451».

6.2. Изучение телевизионной установки УАР-2 для анализа рентгенограмм

6.2.1. Цель

Изучение основных режимов работы установки УАР-2 с помощью рентгенограмм.

6.2.2. Назначение

Установка телевизионная для анализа рентгенограмм УАР-2 предназначена для уменьшения погрешностей интерпретации при анализе рентгенограмм с использованием гармонизации, субтракции, цветового кодирования и оценки геометрических параметров участков рентгенограмм, границы которых задаются оператором.

6.2.3. Технические данные

Установка УАР-2 обеспечивает получение изображения любой из двух рентгенограмм размерами 356×356 мм или их центральных частей при масштабировании не менее 10 раз.

Точность совмещения изображения двух рентгенограмм не менее 0,15 % Н (Н – высота изображения) в круге диаметром 0,8Н.

Время подготовки установки к работе не превышает 15 минут, после подачи на нее электропитания.

Установка сохраняет свои параметры при непрерывной работе в течение 7 часов.

Электропитание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока с напряжением 220_{-22}^{+11} В с частотой 50 Гц.

Мощность, потребляемая аппаратурой от сети, не превышает 1,1 кВт.

6.2.4. Описание структурной схемы устройства установки УАР-2

Упрощенная структурная схема установки УАР-2 изображена на рис. 6.2.1.

Анализируемые рентгенограммы устанавливаются на рабочие поля светильников стола оператора, яркость которых регулируется с помощью соответствующих регуляторов, расположенных рядом с ними.

Подсвеченные рентгенограммы оптическим устройством, состоящим в каждом канале двухтрубчатой телевизионной камеры КТ-179 из двух объективов с разными фокусными расстояниями, проецируются на мишени передающих трубок.

Развертка изображений рентгенограмм осуществляется генератором разверток ГР-346, который работает на оба канала синхронно и синфазно.

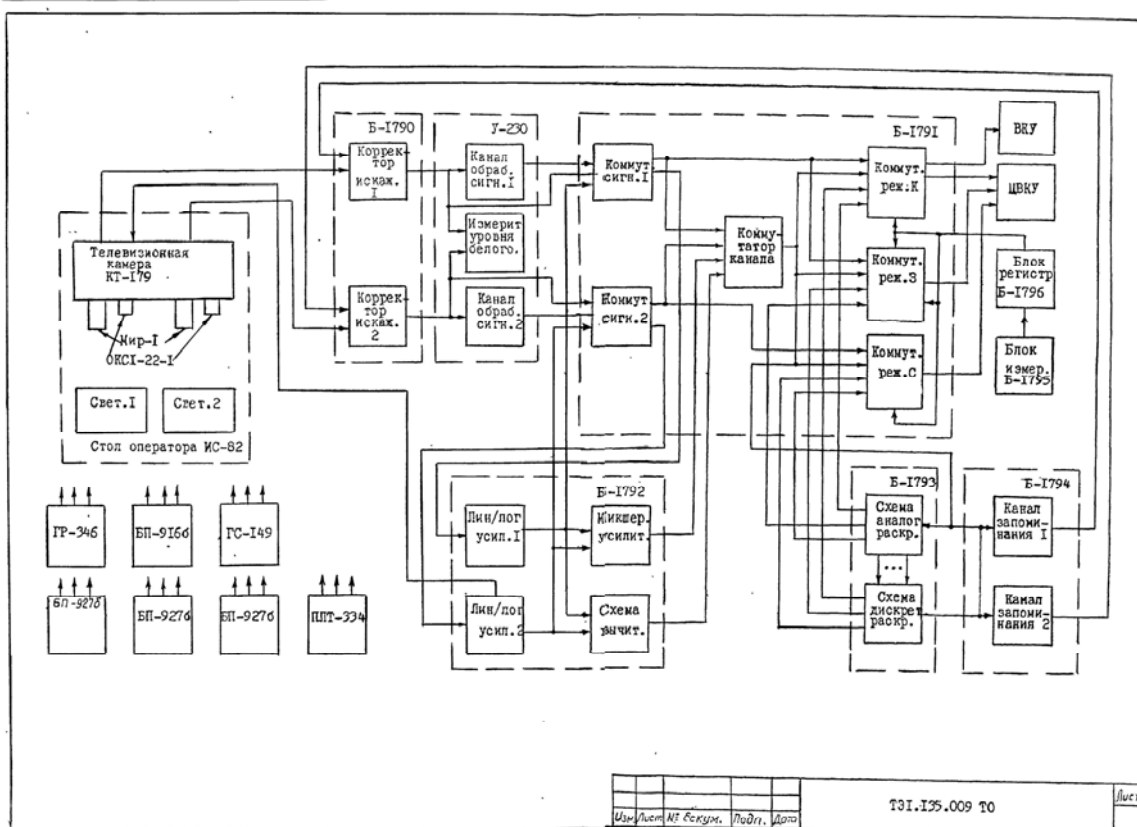


Рис. 6.2.1. Упрощенная структурная схема установки УАР-2

Сигналы изображений рентгенограмм после предварительного усиления в телевизионной камере КТ-179 поступают по кабелям в блок коррекции видеосигнала Б-1790, который состоит из двух идентичных каналов корректоров искажений видеосигнала. С выходов блока коррекции сигнала видеосигналы от обеих рентгенограмм поступают в

блок микширования и коммутации Б-1791, а также в усилитель-ограничитель видеосигнала У-230.

Усилитель-ограничитель У-230 включает в себя два идентичных канала обработки сигнала, каждый из которых содержит формирователь «окна» изображения, ограничитель сигнала по уровню черного в сюжете, схему автоматической регулировки усиления (АРУ), регулятор контраста заданных уровней и схему выборки сигнала.

Измеритель уровня белого сигнала рентгенограмм позволяет контролировать амплитуду входного сигнала, как во всем кадре, так и в выделенной оператором зоне.

С выхода усилителя-ограничителя видеосигнала У-230 сигналы изображений рентгенограмм обоих каналов поступают на соответствующие выходы микширования и коммутации блока Б-1791, который содержит коммутаторы сигнала обеих рентгенограмм, коммутатор канала для рассмотрения изображения одной из рентгенограмм или результата их совместной обработки, три коммутатора режимов работы установки УАР-2. Блок микширования и коммутации предназначен для выбора типов обработки видеосигналов рентгенограмм и выбора режимов работы установки УАР-2.

Из блока микширования и коммутации с выхода коммутатора сигналов видеосигналы обеих рентгенограмм поступают на выходы блока обработки видеосигнала Б-1792, который предназначен для логарифмирования, получения регулируемой суммы и разности входных видеосигналов, а также обеспечивает раздельное наблюдение положительной или отрицательной разностей входных видеосигналов, что позволяет выделить более плотные или менее плотные участки одной из рентгенограмм по сравнению с другой. Видеосигналы обоих каналов с выхода блока Б-1792 поступают на соответствующие входы блока микширования и коммутации Б-1791, а видеосигнал второй рентгенограммы (правого канала) подается также на вход телевизионной камеры КТ-179 для формирования сигнала двумерной аппретурной коррекции.

С выхода коммутатора канала блока микширования коммутации Б-1791 видеосигнал, выбранный с пульта управления ПЛТ-334, поступает на вход блока цветового кодирования Б-1793, который содержит схемы аналогового и дискретного раскрашивания входных видеосигналов. В блоке Б-1793 осуществляется преобразование уровней сигналов черно-белого изображения в соответствующие сигналы цветного изображения.

С выходов цветокодирующих матриц схем аналогового и дискретного раскрашивания видеосигнал поступает на соответствующие входы блока микширования и коммутации Б-1791, на выходе схемы дискретного раскрашивания формируется трехразрядный двоичный код кодируемого в блоке Б-1793 видеосигнала.

Блок коррекции фона Б-1794 содержит два идентичных канала запоминания сигнала, каждый из которых включает в себя последовательно соединенные блок памяти, цифро-аналоговые преобразователи и фильтры нижних частот. Он предназначен для запоминания ошибок компенсации сигналов фонов белых полей в обоих каналах, возникающих в блоке Б-1790 из-за неточного формирования компенсирующих сигналов.

Измеритель геометрических параметров содержит блок измерения Б-1795, блок регистрации Б-1796 и предназначен для оценки периметра и площади фрагмента изображения рентгенограммы, выделяемого оператором с помощью механического манипулятора типа «координатный шар», входящего в состав пульта управления ПЛТ-334.

Пульт управления ПЛТ-334 служит для управления режимами работы установки УАР-2, основными из которых являются следующие:

- просмотр изображения рентгенограмм правого и левого каналов;
- субтракция (вычитание) изображения рентгенограмм;
- цветное кодирование (раскрашивание) рентгенограмм;
- двумерная аппаратная коррекция (гармонизация) сигнала изображения правой рентгенограммы;
- оценка геометрических параметров фрагмента рентгенограммы.

6.2.5. Описание конструкции

Основой конструкции установки УАР-2 является стол оператора ИС-82 и устройство наблюдения. На столе оператора размещаются два светильника, на которые накладываются две рентгенограммы. Уровни освещенности рентгенограмм регулируются соответствующими переменными резисторами, расположенными на столе оператора.

Двухтрубчатая телевизионная камера КТ-179 установлена на кронштейне над столом оператора и может вручную перемещаться в вертикальном направлении. Смена объективов телевизионной камеры осуществляется с помощью горизонтально смещающейся каретки.

В устройстве наблюдения размещено цветное видеоконтрольное устройство (ЦВКУ), два вставных каркаса (секция датчика С-1627 и

секция анализа С-1628) с электронными блоками и пульт управления ПЛТ-334. При проведении фоторегистрации изображений предусмотрена установка тубуса на ЦВКУ. В комплект установки входит также черно-белое ВКУ, которое подключается к устройству наблюдения.

6.2.6. Указание мер безопасности

В установке УАР-2 имеются опасные для жизни напряжения:

- 20 кВ – на аноде кинескопа цветного видеоконтрольного устройства;
- 600 В – опасное напряжение на сетке передающей трубки;
- 500 В – напряжение второго анода передающей трубки;
- 300 В – напряжение первого анода передающей трубки;
- 220 В – напряжение переменного тока;
- 150 В – постоянное напряжение на модуляторе передающей трубки.

Лица, назначаемые на самостоятельную работу, связанную с эксплуатацией установки УАР-2, обязаны пройти производственное обучение на рабочем месте, знать «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила устройства электроустановок» в объеме первой квалификационной группы по технике безопасности при работе с радиоэлектронным оборудованием.

На рабочем месте (на полу) должен быть резиновый коврик.

При работе с установкой УАР-2 необходимо соблюдать следующие правила:

- нельзя оставлять включенную установку без надзора;
- нельзя производить подсоединение и отсоединение кабелей и цепей питания при включенной в сеть установке;
- работы по ремонту и настройке установки, при которых может возникнуть опасность прикосновения к токоведущим частям установки, следует производить одной рукой;
- замену ламп светильников стола оператора ИС-82 и замену предохранителей производить только при выключенной установке и с отключенным сетевым кабелем.

6.2.7. Подготовка к работе

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с техническим описанием установки УАР-2.

2. Включить сетевой кабель в розетку.

3. Установить тумблеры СЕТЬ на цветном или черно-белом ВКУ в положение ВКЛ.

4. Включить тумблер СЕТЬ на пульте управления ПТЛ-334 и повернуть через 2-3 минуты ручку ЯРКОСТЬ на ЦВКУ вправо до появления свечения экрана. Установить ручку КОНТРАСТНОСТЬ в среднее положение. Аналогично установить соответствующие ручки черно-белого ВКУ.

5. Установить таблицы 0249 на рабочие поля светильников стола оператора ИС-82 и зафиксировать с помощью соответствующих прижимных рамок.

6. Включить тумблеры ВКЛ. СВЕТИЛЬНИК 1 и ВКЛ. СВЕТИЛЬНИК 2 на столе оператора.

7. На пульте управления в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ИСХ.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ.

8. Убедиться в наличии черно-белого изображения таблицы ТИТ 0249 левого канала на экранах ЦВКУ и ВКУ.

9. С помощью ручки механизма перемещения телевизионной камеры сместить ее в вертикальное положение до получения на экранах ВКУ и ЦВКУ всего изображения таблицы ТИТ 0249 полностью.

10. Подфокусировать изображение с помощью объектива ОКС1-22-1 и регулировкой его диафрагмы, регулировкой освещенности соответствующего светильника стола оператора (регулятором СВЕТИЛЬНИК 1) установить показания стрелочного прибора, находящегося в устройстве наблюдения, на отметку (100 ± 10) делений. Подготовка к работе левого канала закончена.

11. На пульте управления функциональной группы КАНАЛ нажать переключатель ПРАВЫЙ.

12. Повторить регулировки п. 7–10 для правого канала.

13. В обоих каналах установки УАР-2 записать в память сигнал черного поля, для чего на пульте управления в функциональных группах ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ОГР.;
- в группе ИЗМЕРЕНИЕ – переключатель СБРОС, а затем ЗОНА.

После этого нажать и отжать переключатель ВКЛ. группы ЗАПИСЬ для обоих положений переключателя ЛЕВЫЙ-ПРАВЫЙ этой же группы. Отожмите переключатель ЗОНА группы ИЗМЕРЕНИЕ.

6.2.8. Порядок выполнения работы

Установка УАР-2 является многофункциональной аппаратурой, поэтому рассмотрим основные режимы работы:

1. Просмотр черно-белых изображений рентгенограмм

1.1. Наблюдение исходного изображения рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ИСХ.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ или ПРАВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ.

1.2. Наблюдение контрастного изображения рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель КОНТРАСТ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ или ПРАВЫЙ.

При наблюдении слабоконтрастных изображений рекомендуется пользоваться переключателями вспомогательной функциональной группы ДИАПАЗОН и ОКНО (см. п. 1.7).

1.3. Увеличение контраста изображения заданных оператором плотностей рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель УРОВ.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ или ПРАВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ.

С помощью регулировки ПОЛОЖЕНИЕ в группе СИГНАЛ и переключателей во вспомогательной группе ВЕЛИЧИНА УРОВНЯ выбрать требуемый диапазон наблюдаемых плотностей рентгенограмм. Для одновременного наблюдения остальной части изображения необходимо воспользоваться соответствующими переключателями вспомогательной группы ЗАМЕШИВАНИЕ: ВКЛ и ЛЕВЫЙ-ПРАВЫЙ, после чего отключить указанную группу.

1.4. Снижение яркости, мешающей восприятию светлого фона изображения рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ОГР.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ или ПРАВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ.

При наблюдении слабоконтрастных изображений рекомендуется пользоваться переключателями вспомогательной функциональной группы ДИАПАЗОН.

1.5. Наблюдение прологарифмированного изображения рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать переключатель ЛОГАРИФМ и выбрать требуемую предварительную обработку сигналов изображений рентгенограмм согласно пп. 1.1–1.4.

1.6. Наблюдение негативного изображения рентгенограммы. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать переключатель НЕГАТИВ и выбрать требуемую предварительную обработку сигналов изображений рентгенограмм согласно пп. 1.1–1.5.

1.7. Обработка сигнала изображения рентгенограммы в «окне» изображения, выбираемого оператором. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОКНО выбрать необходимые размеры и положение наблюдаемого окна изображения. Требуемую предварительную обработку сигналов изображений рентгенограмм выбрать согласно пп. 1.2–1.6; для наблюдения остальной части исходного изображения рентгенограмм необходимо воспользоваться соответствующими переключателями функциональной группы ЗАМЕШИВАНИЕ: ВКЛ и ЛЕВЫЙ-ПРАВЫЙ. После работы по п. 1.7 отключить переключатели функциональных групп ОКНО и ЗАМЕШИВАНИЕ.

2. Субтракция изображений рентгенограмм

При субтракции изображений рентгенограмм правого и левого каналов необходимо предварительное совмещение их изображений, которое осуществляется в два этапа:

- грубое совмещение – механическим перемещением рентгенограмм друг относительно друга;
- точное совмещение – смещением изображений рентгенограмм друг относительно друга с помощью регулировок функциональной группы переключателей СОВМЕЩЕНИЕ, расположенных на пульте управления ПЛТ-334.

2.1. Получение регулируемой разности черно-белых изображений двух рентгенограмм. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать в группе КАНАЛ переключатель РАЗН. и провести регулировку БАЛАНС.

Выбор требуемой обработки сигналов изображений рентгенограмм может осуществляться согласно пп. 1.1–1.8.

2.2. Получение суммарного черно-белого изображения двух рентгенограмм. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать в группе КАНАЛ переключатель СУММА и провести регулировку БАЛАНС.

Выбор требуемой обработки сигналов изображений рентгенограмм может осуществляться согласно пп. 1.1.–1.8.

2.3. Получение суммарного изображения двух рентгенограмм, закодированного цветом. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать в группе РЕЖИМ переключатель ЦВЕТ. КОНТРАСТ. При этом более плотные участки одной из рентгенограмм по сравнению с другой кодируются одним цветом, в случае одинаковых плотностей обеих рентгенограмм суммарное изображение будет черно-белым.

Выбор требуемой обработки сигналов изображений рентгенограмм может осуществляться согласно пп. 1.1–1.5, 1.7, 1.8.

2.4. Раздельное наблюдение черно-белых изображений более плотных участков одной из рентгенограмм по сравнению с другой. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональной группе КАНАЛ нажать переключатель РАЗН., во вспомогательной функциональной группе ЗАМЕШИВАНИЕ переключатель ВКЛ., а также БЕЗ ИЗМ. и получить необходимое изображение соответствующим положением переключателя ЛЕВЫЙ-ПРАВЫЙ.

Обработку сигналов изображений рентгенограмм проводить по пп. 1.1–1.7.

После работы по пп. 2.4 отключить вспомогательную функциональную группу ЗАМЕШИВАНИЕ и переключатель БЕЗ ИЗМ.

3. Цветовое кодирование изображений рентгенограмм

3.1. Аналоговое цветовое кодирование черно-белых изображений рентгенограмм. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать в группе РЕЖИМ переключатель АНАЛОГ. РАСКР. и при необходимости произвести регулировку положения наблюдаемых на ЦВКУ цветов с помощью ручки РЕГ. ЦВЕТА.

Выбор требуемой обработки сигналов изображений рентгенограмм может осуществляться согласно пп. 1.1–1.8, п. 2.1, 2.2.

Для проверки последовательности наблюдаемых цветов на пульте управления ПЛТ-334 нажать переключатель ШКАЛА при обработке сигнала согласно п. 1.1.

3.2. Дискретное цветовое кодирование черно-белых изображений рентгенограмм. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать в груп-

пе РЕЖИМ переключатель ДИСКРЕТ. РАСКР. и при необходимости произвести регулировку наблюдаемых на ЦВКУ цветов с помощью ручки РЕГ. ЦВЕТА.

Выбор требуемой обработки сигналов изображений рентгенограмм может осуществляться согласно пп. 1.1–1.8, п. 2.1, п. 2.2.

Для проверки последовательности наблюдаемых цветов на пульте управления ПЛТ-334 нажать переключатель ШКАЛА при обработке сигнала согласно п.2.1.

4. Гармонизация изображений рентгенограммы

4.1. Наблюдение изображений мелких деталей рентгенограммы. Установить рентгенограмму на рабочее поле светильника правого канала стола оператора ИС-82, установить диафрагму объектива левого канала в положение, соответствующему минимальному освещению.

На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ИСХ. или КОНТР.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ;
- в группе КОРРЕКЦИЯ – переключатель ВКЛ.

Произвести регулировку СТЕПЕНЬ в функциональной группе КОРРЕКЦИЯ и регулировкой диафрагмы левого объекта добиться необходимого качества изображения. При необходимости выключить светильник левого канала и установить требуемое положение диафрагмы левого объекта.

После работы по п. 4.1 включить светильник левого канала и отключить функциональную группу КОРРЕКЦИЯ.

4.2. Повышение качества мелких деталей исходного изображения рентгенограммы. Методика работы по п. 4.2 аналогична приведенной в п. 4.1, кроме положения переключателей в функциональной группе КАНАЛ, которые должны быть в положении РАЗН. Степень подчеркивания контраста мелких деталей рентгенограммы дополнительно регулируется ручкой БАЛАНС функциональной группы КАНАЛ.

4.3. Повышение контраста мелких деталей рентгенограммы в окне изображения, выбираемого оператором. Методика работы по п. 4.3 аналогична приведенной в п. 4.1 или п. 4.2.

5. Оценка периметра P и S фрагмента рентгенограммы

5.1. Погрешность измерения геометрических параметров не превышает 8 %, если линейные размеры измеряемого фрагмента рентгенограммы по вертикали и горизонтали составляют не менее половины от линейных размеров рабочего поля измерения, задаваемого рамкой.

5.2. Перед началом измерения Р и S (после включения и прогрева аппаратуры) произведите проверку и калибровку аппаратуры с помощью специальных калибровочных колец. Размеры колец и соответствующие им величины параметров и площадей приведены в табл. 6.2.1.

Таблица 6.2.1

Номер кольца	Внутренний диаметр кольца, мм	Периметр внутренней области, мм	Площадь внутренней области, мм ²
1	127,6 ± 0,1	400	12800
2	63,8 ± 0,05	200	3200
3	31,9 ± 0,03	100	800
4	15,9 ± 0,02	50	200

Проверку и калибровку аппаратуры в режиме измерения периметра Р и площади S проводить в следующем порядке:

5.2.1. На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель ИСХ.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ЧЕРНО-БЕЛЫЙ;
- в группе КОРРЕКЦИЯ – переключатель ВКЛ.

Во вспомогательной функциональной группе переключатель БЕЗ ИЗМ. должен быть в отжатом положении.

На экране ЦВКУ должны наблюдаться изображения прямоугольной рамки, ограничивающей поле измерения букв Р, S, цифр и светящейся точки внутри поля измерения. Точка может совпадать с рамкой.

5.2.2. Поместите на рабочее поле светильника левого канала рентгенограмму. Перемещением телевизионной камеры КТ-179 подберите масштаб изображения рентгенограммы на экране ЦВКУ такой, чтобы размер измеряемого оператором участка рентгенограммы занимал не менее половины от линейных размеров рабочего поля измерения. После измерения масштаба изображения рентгенограммы, всякий раз необходимо объективом сфокусировать изображение и установить диафрагму в такое положение, при котором уровень сигнала по стрелочному прибору соответствовал бы 100 ± 10 мкА. Из набора колец, приведенного в табл. 6.2.1, подберите кольцо, размеры изображения которого на экране ЦВКУ совместимы с объектом измерения. Оставьте выбранное кольцо на том же светильнике, а рентгенограмму уберите. Поместите кольцо вовнутрь рабочего поля измерения.

Вращая координатный шар, расположенный на пульте управления ПЛТ-334, поместите светящуюся точку (маркер) на поверхность кольца. Нажмите переключатель СБРОС на пульте управления ПЛТ-334. Вращая координатный шар, обведите маркером кольцо, двигаясь внутри поверхности кольца по его внутренней части. При этом необходимо не выходить маркером за пределы поверхности кольца. Окончание обвода производите строго в элементе изображения, соседнем с началом обвода. Снимите показания счетчиков P , которые высвечиваются на экране ЦВКУ. Нажмите кнопку ЗОНА и снимите показания счетчика S . Если при обводе маркер выйдет за пределы поверхности кольца, повторите обвод кольца, предварительно нажав переключатель СБРОС и отжав переключатель ЗОНА. Аналогично произведите не менее 10 измерений при различных положениях кольца в рабочем поле измерений, всякий раз нажимая перед началом измерения переключатель СБРОС, и отжав переключатель ЗОНА.

Вычислите среднее значение параметра P и площади S кольца для данного масштаба изображения по формулам:

$$P'_{\text{cp}} = \frac{\sum_{\ell=1}^{10} P_{\ell}}{10}; \quad (1)$$

$$S'_{\text{cp}} = \frac{\sum_{\ell=1}^{10} S_{\ell}}{10}. \quad (2)$$

Вычислите коэффициенты перевода K'_P и K'_S показаний аппаратуры для данного масштаба изображения в метрическую систему единиц по формулам:

$$K'_P = \frac{P}{P'_{\text{cp}}}; \quad (3);$$

$$K'_S = \frac{S}{S'_{\text{cp}}}, \quad (4).$$

где P (мм) – периметр внутренней области выбранного из табл. 6.2.1 калибровочного кольца; S (мм²) – площадь внутренней области выбранного из табл. 6.2.1 калибровочного кольца.

5.3. Измерение периметра и площади участка рентгенограммы. Методика измерения P и S аналогична п. 5.2.2.

Положите вместо кольца рентгенограмму так, чтобы измеряемый участок изображения находился внутри рабочего поля измерения. На-

жмите переключатель СБРОС и отожмите ЗОНА. Вращая координатный шар, обведите маркером измеряемый участок. Окончание обвода произведите строго в элементе изображения, соседнем с началом обвода. Для повышения точности измерения участка рентгенограммы произвести измерения несколько раз, нажимая перед началом измерения переключатель СБРОС и отжав ЗОНА. В качестве результата измерения необходимо взять среднее значение параметра из нескольких показаний. Показания среднего значения параметра следует умножить на коэффициент перевода K'_p или K'_s для данного масштаба изображения.

5.4. Исключение из результата измерения площади участка рентгенограммы значений площадей ее внутренних участков. На пульте управления отожмите переключатель ЗОНА, а во вспомогательной функциональной группе нажмите переключатель БЕЗ ИЗМ.

Вращая координатный шар, переместить маркер на область, площадь которой необходимо исключить. Маркер не будет оставлять след. Нажмите кнопку СБРОС. При необходимости исключить какую-либо область из общей площади отожмите переключатель ЗОНА и снова нажмите БЕЗ ИЗМ., СБРОС. Переведите маркер на эту область. Отожмите переключатель БЕЗ ИЗМ. Обведите новую область маркером. После окончания измерений при необходимости умножьте показания счетчиков площади на коэффициент перевода для данного масштаба изображения

5.5. Суммирование площадей нескольких участков рентгенограммы. Измерение проводится по методике по п. 5.4, при этом показания счетчиков площади будут увеличиваться.

5.6. Измерение площадей цветов (определенных плотностей рентгенограмм) при цветовом кодировании черно-белых изображений.

С помощью координатного шара выделите зону интереса, внутри которой необходимо произвести измерение площадей цветов аналогично п. 5.3. Нажать переключатель БЕЗ ИЗМ., ШКАЛА, УРОВ. ЦВЕТ. На пульте управления положения переключателей группы ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ должны соответствовать требуемым в п. 3.2 для п. 1.1 и 1.3.

Нажать переключатель СБРОС группы ИЗМЕРЕНИЕ и один из переключателей УРОВНИ ЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ. Убедиться в увеличении яркости соответствующего цвета в пределах выбранной зоны интереса. Повторить эту процедуру для всех поочередно семи отжатых переключателей УРОВНИ ЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ, а затем для всех семи отжатых переключателей для измерения площади восьмого цвета.

После работы отожмите переключатели ВКЛ, ЗОНА группы ИЗМЕРЕНИЕ, а также переключатели ШКАЛА, БЕЗ ИЗМ., УРОВ. ЦВЕТ вспомогательной функциональной группы.

Примечание. При необходимости для повышения точности компенсации неравномерности фона белого цвета внутри измеряемой зоны, предъявите соответствующему каналу телевизионной камеры чистое поле светильника. Регулировкой диафрагмы объектива соответствующего канала установите показания стрелочного прибора на отметку 100 ± 10 делений.

На пульте управления ПЛТ-334 в функциональных группах переключателей ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ нажать:

- в группе СИГНАЛ – переключатель УРОВ.;
- в группе КАНАЛ – переключатель ЛЕВЫЙ или ПРАВЫЙ;
- в группе РЕЖИМ – переключатель ДИСКРЕТ. РАСКР.;
- в группе ВЕЛИЧИНА УРОВНЯ – переключатель 1 или 2.

С помощью ручки ПОЛОЖЕНИЕ группы СИГНАЛ раскрасьте изображение белого поля в максимальное количество цветов. Установите соответствующее положение переключателя ЛЕВЫЙ-ПРАВЫЙ группы ЗАПИСЬ, при этом количестве наблюдаемых на экране цветов должно уменьшиться.

6.2.9. Задание

1. Изучить принцип работы установки УАР-2.
2. Произвести осмотр двух рентгенограмм, выданных преподавателем.
3. Сравнить эти две рентгенограммы.
4. Провести оценку геометрических параметров фрагмента рентгенограмм.

6.2.10. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Привести краткое описание структурной схемы.
3. Привести порядок выполнения лабораторной работы.
4. Привести результаты измерений.
5. Выводы по работе.
6. Ответы на контрольные вопросы.

6.2.11. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы установки телевизионной камеры УАР-2?
2. Основа конструкции установки.
3. Основные режимы работы установки УАР-2.
4. Что необходимо для обеспечения режима двумерной аппаратурной коррекции?
5. Какие возможны виды обработок черно-белых изображений рентгенограмм?
6. Для чего предназначен блок измерения Б-1795? Основа его работы.

Список использованных источников

1. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия: 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1974. – 512 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. – В 2 кн. Кн. 1 / под. ред. В.В. Ключева. – М.: «Машиностроение», 1976.
3. Техническая инструкция по эксплуатации установки телевизионной для анализа рентгенограмм УАР-2.

6.3. Индивидуальный дозиметрический контроль методом ИФКУ

6.3.1. Цель работы

Определение доз внешнего облучения с помощью дозиметра типа ИФКУ.

6.3.2. Введение

По мере дальнейшего расширения области применения радиоактивных изотопов в науке, технике, промышленности, медицине и т. д. большое число людей работает в помещениях с повышенным уровнем радиации, непосредственно подвергается действию опасного излучения. В связи с этим очень важно проводить систематический контроль за состоянием их здоровья, и в частности, измерять полученную организмом за рабочий день или неделю дозу радиоактивного излучения.

Для этой цели используют индивидуальный фотоконтроль (ИФК) – это система контроля дозы излучения, получаемой отдельными лицами, основанная на фотографическом методе дозиметрии. ИФК – наиболее распространенный метод дозиметрии. Каждому работнику выдается кассета со специальными сортами пленки для постоянного ношения. Через определенный срок пленки фотографически обрабатывают и по

плотности почернения определяют индивидуальную дозу, полученную за контрольный срок.

6.3.3. Краткое описание теории

Радиографические пленки реагируют на прошедшее через них излучение. В процессе экспонирования изменяются параметры чувствительного слоя, обеспечивая регистрацию изменения интенсивности излучения.

Пленки обладают интегрирующей способностью регистрировать чрезвычайно низкие потоки излучения за длительное время просвечивания в широком диапазоне энергий. Фотографическая эмульсия содержит чувствительную к излучению галоидную соль серебра (обычное бромистое серебро с небольшой примесью йодистого), равномерно в виде зерен распределенную в тонком слое желатины. Эмульсию наносят на подложку (целлюлозу, стекло, бумагу и т. д.) с обеих сторон. При облучении пленки проникающим излучением в кристаллах бромистого серебра происходят изменения, приводящие к тому, что кристалл становится способным к проявлению, т. е. восстановлению металлического серебра, под действием проявителя.

Метод радиографии основан на том, что степень почернения D радиографической пленки, находящейся в поле излучения, пропорциональна экспозиционной дозе X .

$$D = D_{\max} \cdot [1 - e^{-kx}], \quad (1)$$

где X – экспозиционная доза ионизирующего излучения; D_{\max} – максимальная плотность почернения для данного типа пленок; k – коэффициент чувствительности для данного типа пленок и источника излучения.

Достоинства метода ИФК в его документальности (экспонированные и обработанные пленки можно хранить), простоте в обращении и дешевизне. Недостатками метода являются его невысокая чувствительность, длительный цикл обработки пленки и невозможность её повторного использования. Из-за малой чувствительности кассеты приходится носить в течение нескольких дней.

На плотность почернения пленки помимо дозы излучения влияют сорт пленки, состав и температура проявления, длительность проявления. Точно внести поправки на условия обработки пленки нельзя, поэтому все пленки, относящиеся к одной серии измерений, должны обрабатываться одновременно.

Кроме рабочих пленок, выдаваемых для ношения, имеются контрольные и градуировочные пленки. Контрольные пленки служат для определения фона (вуали), а градуировочные пленки используются для построения градуировочной кривой.

Градуировочная кривая – зависимость плотности почернения от дозы – строится экспериментально для каждой партии пленок по облучению известными дозами. С помощью градуировочной кривой по плотностям рабочих пленок находят индивидуальные дозы.

6.3.4. Описание экспериментальной установки

Назначение и область применения

Комплект ИФКУ-1 – настольного типа, состоит из кассеты и измерительного пульта. Предназначен для регистрации интегральных экспозиционных доз γ -излучения. Комплект позволяет регистрировать дозы бета- и нейтронного излучений при наличии методики измерения. При помощи комплекта можно проводить индивидуальный контроль облучения персонала, занятого на работах с радиоактивными веществами.

Диапазон регистрируемых экспозиционных доз: гамма-излучение и тепловые нейтроны 0,05...2,0 бэр; бета- излучение 0,05...2,0 бэр;

Основная погрешность измерения регистрируемых экспозиционных доз:

- гамма-излучение не более $\pm 25 \%$
- бета- излучение $\pm 20 \%$
- тепловых нейтронов $\pm 25 \%$

В комплекте используются пленки типа РМ-5-1 и РМ-5-3.

Принцип действия

Принципиальная схема дозиметра ИФКУ представлена на рис. 6.3.1.

Методика индивидуального фотографического контроля основана на непосредственном определении дозы ионизирующего излучения по оптической плотности почернения рентгеновской пленки с помощью измерительного пульта (предварительно откалиброванного по контрольным пленкам). Принцип работы прибора сводится к измерению тока, возникающего в фотоэлементе под воздействием света, проходящего через фотометрируемый участок рентгеновской пленки.

Для измерения фототоков применена схема (рис. 6.3.1), в которой используется логарифмическая зависимость между запирающим напряжением и током в диоде ($ЛД$), шунтированным сопротивлением ($R9$). Падающее на этом сопротивлении напряжение подается на усилитель постоянного тока, собранный по балансной схеме, на выходе которого включен показывающий прибор типа М-265. Последовательно с прибором М-265 включены добавочные сопротивления, дающие возможность регулировать чувствительность при градуировке прибора.

Для установки контрольной точки в левой части шкалы используется потенциометр «0.1–0.5» ($R2$). Установка контрольной точки в сере-

дине шкалы при выборе режима работы диода (Л1), осуществляется с помощью потенциометра «РД» (R5). Установка контрольной точки в конце шкалы производится потенциометром «0.5–1.0» (R13).

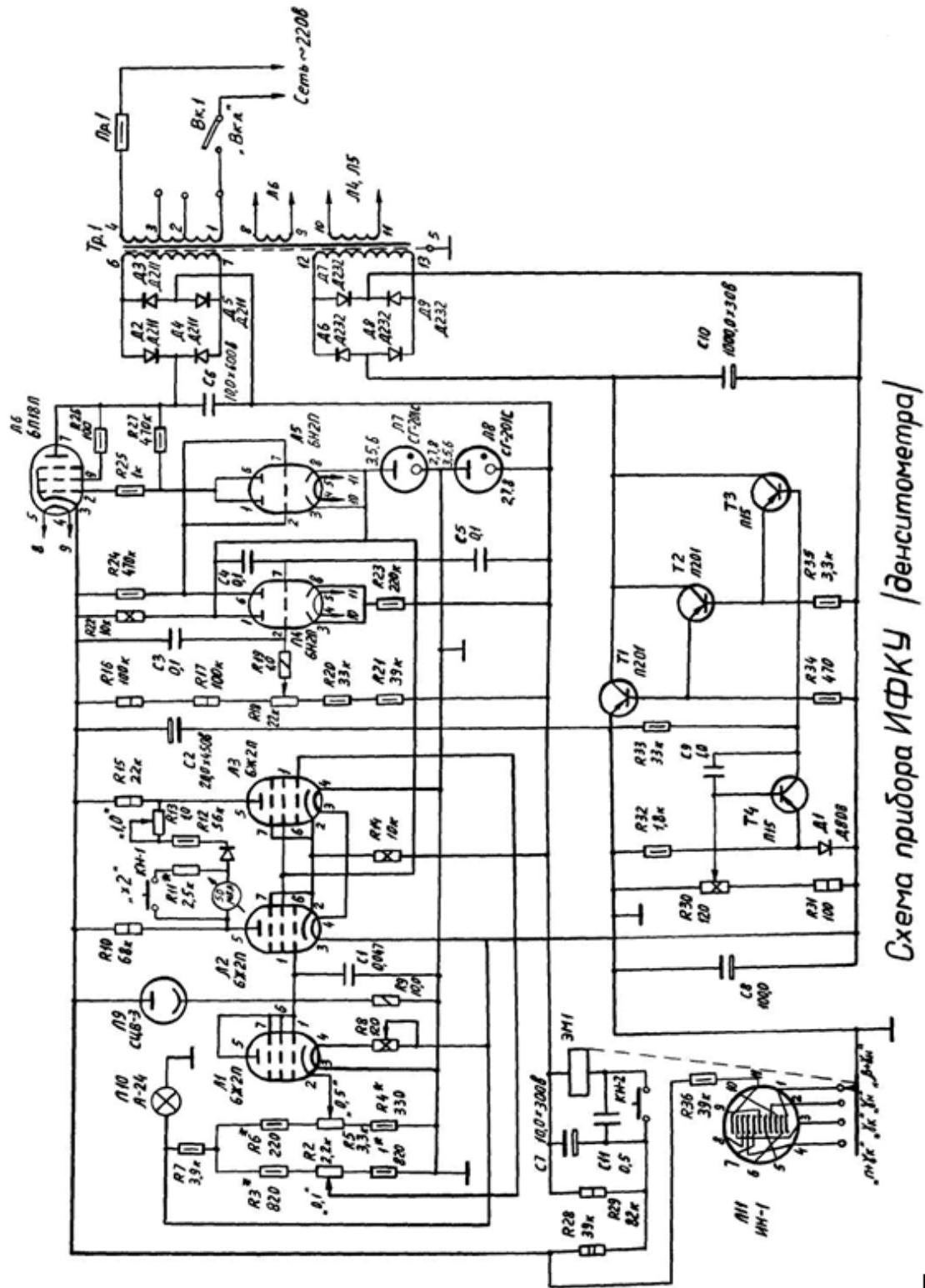


Схема прибора ИФКУ (денситометра)

Рис. 6.3.1. Схема прибора ИФКУ

Показания прибора пропорциональны оптической плотности почернения рентгеновской пленки.

Механизм смены полей исключает возможность ошибки при определении вида излучения, от которого считывается доза.

В схеме использован фотоэлемент типа СЦВ-3 (Л9), который питается напряжением 200 В.

Питание накалов ламп 6Ж2П и лампы просвечивания типа А-24 (Л10) осуществляется постоянным током от стабилизированного выпрямителя +12,6 В, собранного на транзисторах (Т1–Т4).

Питание анодов ламп усилителя постоянного тока производится от электронного стабилизатора напряжением 300 В, собранного на лампах 6Н2П (Л4 и Л5) и 6П18П (Л6).

Для создания опорного напряжения в электронном стабилизаторе используется стабилитрон типа СГ201С (Л7 и Л8).

Лампы 6Ж2П перед установкой в схему подвергаются тренировке в течение 50–100 часов при номинальных напряжениях на электродах.

Калибровка прибора и определение дозы

1. Перед включением прибора в сеть установить тумблер «Сеть» в положение «Выключено».

2. Подключить прибор к сети.

3. Включить тумблер «Сеть», через 0,5 минуты должна загореться сигнальная лампа, расположенная над механизмом смены полей.

4. Прогреть прибор в течение 30–40 минут.

Прежде, чем пользоваться прибором для непосредственного считывания доз, необходимо убедиться в том, что данная партия рентгеновской пленки является линейной в пределах ошибок измерения дозы данным методом. Для этого облучаются 10 контрольных пленок и прибор калибруется как указано ниже.

Если показания прибора при измерении контрольных пленок не выходят за пределы ошибок измерения прибора, то такая партия рентгеновской пленки пригодна для прямых измерений на приборе ИФКУ; если же ошибки измерений превышают допустимые ошибки, то для этой партии пленок необходимо построить на бумаге зависимость показаний прибора от контрольных доз, предварительно откалибровав прибор по пленкам 0,1 и 1,0 бэр для его последующей проверки.

Калибровку прибора следует производить в следующей последовательности:

1. Установить с помощью кнопки «Смена поля» обойму механизма смены полей в положение, при котором на индикаторе появится цифра «3»;
2. Поместить в обойму пленку с дозой 0,1 бэр и ручкой «0.1–0.5» установить стрелку прибора на деление 0,1 по верхней шкале, обозначенной «3–4»;
3. Сменить пленку с дозой 0,1 бэр на пленку 1,0 бэр и ручкой «0.5–1.0» стрелку прибора установить на деление 1,0;
4. Повторить операции 2 и 3 несколько раз до совпадения стрелки с делениями 0,1 и 1,0.

Снятие показаний с пленочных дозиметров на приборе ИФКУ можно производить двумя способами:

1. Непосредственным считыванием величины дозы по всей шкале прибора в диапазоне от 0,05 до 2,0 бэр при условии, если пленка обладает достаточной линейностью;
2. По градуировочной кривой зависимости показаний прибора от величины дозы, полученной по контрольным пленкам с дозами 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3; 1,5; 2,0 бэр.
4. Определение дозы непосредственным считыванием показаний.

После калибровки прибора с помощью контрольных пленок определение дозы производится следующим образом:

Определение дозы от бета-излучения:

- а) вставить рабочую пленку в обойму до упора;
 - б) утопить обойму до появления на индикаторе цифры «1»;
 - в) по нижней шкале прибора, обозначенной «1–2,» отсчитать условную дозу D_1 ;
 - г) кнопкой «Смена поля» переместить обойму в положение, при котором на индикаторе загорится цифра «2»;
 - д) по шкале «1–2» отсчитать условную дозу D_2 ;
- Доза от бета-излучения определяется как разность:

$$D_{\beta} = D_1 - D_2.$$

Определение дозы от гамма-излучения:

- а) кнопкой «Смена поля» переместить обойму с фотометрируемой пленкой в положение, при котором на индикаторе появится цифра «3»;
- б) отсчитать дозу $D_3 = D_{\gamma}$ по верхней шкале прибора, обозначенной «3–4».

Определение дозы с помощью градуировочной кривой

а) калибруют прибор в положении «3» по пленкам 0,1 и 1,0 бэр и снимают зависимость показаний прибора N от дозы на контрольных пленках.

б) передвигая обойму с фотометрируемой пленкой с помощью кнопки «Смена поля» по верхней шкале, обозначенной «3–4,» считывают последовательно показания прибора N_1 , N_2 , N_3 и N_4 , где индексы соответствуют номеру фотометрируемого поля.

в) по градуировочной кривой $N = f(D)$ определяют соответствующие дозы облучения.

5. Конструкция ИФКУ-1 представляет собой кассету, состоящую из корпуса, крышки и булавки для крепления кассеты в одежде. Корпус кассеты разделен на четыре секции.

Первая секция («Входное окно») служит для регистрации дозы излучения. Толщина «Входного окна» выбрана 300 мг/см^2 .

Вторая секция используется в качестве фоновой при регистрации дозы β -излучения. Толщина стенки корпуса на этом участке составляет 900 мг/см^2 .

Третья секция предназначена для регистрации дозы γ -излучения. В этой секции расположены компенсирующие фильтры из алюминия толщиной 0,5 мм и свинца толщиной 0,75 мм.

Четвертая секция с кадмиевым фильтром толщиной 0,027 мм служит для измерения дозы тепловых нейтронов. Толщина кадмия выбрана такой, чтобы при равных дозах тепловых нейтронов и γ -излучения оптическая плотность почернения рентгеновской пленки была одинаковой.

Кассета помещается в чехол (из пластика толщиной 20...30 мг/см^2), который пристегивается к застежке комбинезона или халата.

После определенного срока ношения, кассета направляется в фотолабораторию для обработки. Поступающие в дозиметрическую фотолабораторию кассеты подвергаются проверке на загрязненность. После дезактивации (если это необходимо) приступают к обработке пленок. В связи с тем, что плотность почернения рентгеновской пленки очень сильно зависит от условий проявления, одновременно с рабочими пленками обрабатываются контрольные пленки. Последние предназначены для калибровки прибора и построения градуировочной кривой (в некоторых случаях). Облучаются контрольные пленки фотонным излучением в диапазоне 0,05...2 бэр.

6.3.5. Меры безопасности

Работа с электронными приборами разрешается только после ознакомления с инструкцией по технике безопасности, действующей в лабораториях кафедры.

Работа с электронным прибором на месте его размещения производится с соблюдением «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

В приборах имеются напряжения, опасные для жизни, поэтому категорически запрещается работа с прибором, если на нем нет защитного кожуха и его корпус не заземлен.

Следует всегда помнить, что нарушение правил техники безопасности влечет за собой дисциплинарную, административную и уголовную ответственность.

6.3.6. Порядок работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и инструкцией к прибору ИФКУ.

2. Получить у преподавателя пленки в кассетах.

3. Прокалибровать прибор по контрольным пленкам.

4. Профотометрировать пленки индивидуальных дозиметров. Методом непосредственного считывания определить суммарные дозы облучения группы сотрудников (категория А) за 4 недели.

5. Распределить пленки по группам облучения в соответствии с НРБ. Составить таблицу.

6. Написать заключения.

7. Ответить на контрольные вопросы.

8. Составить отчет.

6.3.7. Методические указания по выполнению работы

Калибровку прибора следует производить в следующей последовательности:

а) поместить в гнездо контрольную пленку № I, облученную дозой 0,1 Р, и ручкой с обозначением «0,1» установить стрелку прибора на деление 0,1 на шкале;

б) сменить контрольную пленку № I на контрольную пленку № 9, облученную дозой 1,0 Р, и ручкой с обозначением «1,0» установить стрелку прибора на деление 1,0;

в) повторить операции а) и б) несколько раз до совпадения стрелки с делением 0,1 и 1,0.

В учреждениях, где проводятся работы с применением радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений, должен осуществляться радиационный контроль, целью которого является контроль соблюдения НРБ и СП и получение информации о дозе облучения персонала. Контроль радиационной обстановки включает и индивидуальный дозиметрический контроль персонала, который осуществляется в соответствии с НРБ-99.

Предельно допустимый уровень облучения всего организма, установленный санитарными правилами для лиц, профессионально связанных с использованием источников ионизирующих излучений, определяется следующим:

Для персонала категории А, при продолжительности облучения 1700 ч/год, в помещениях постоянного пребывания персонала – 1120 мкБэр/ч, при продолжительности облучения 850 ч/год в помещениях, в которых персонал пребывает не более половины рабочего времени – 2900 мкБэр/ч. уточнить по НРБ-99.

Для категории Б при продолжительности облучения 2000 ч/год в помещениях учреждения и на территории санитарно-защитной зоны, где находятся лица, относящиеся к категории Б, мощность дозы 0,12 мБэр/ч, при продолжительности облучения 8800 ч/год в любых помещениях (в том числе жилых) и территории в пределах санитарно-защитной зоны мощность дозы 0,03 мБэр/ч.

6.3.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Назначение и область применения дозиметра типа ИФКУ.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Порядок выполнения работы.
5. Результаты измерения и их обработка.
6. Вывод по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

6.3.9. Контрольные вопросы

1. Что положено в основу ИФКУ?
2. Принцип действия дозиметра.
3. Конструкция дозиметра.

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии: учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1978.
2. Авотин Ю.П. Практикум по радиоактивности: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1974.
3. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. – В 2 кн. Кн. 1 // под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1976.
4. Баранов В.И., Сердюкова А.С. и др. Лабораторные работы и задачи по радиометрии. – М.: Атомиздат, 1966.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ-99. – М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с.

6.4. Изучение счетно-пусковой установки СПУ 1-1М и измерение плотности потока нейтронов

6.4.1. Цель работы

Изучить принцип работы счетно-пусковой установки СПУ 1-1М и провести измерения плотности потока нейтронов.

6.4.2. Назначение

Счетно-пусковая установка СПУ 1-1М является индикаторно-сигнализационной установкой и предназначена для оценки относительного изменения плотности потока нейтронов, звуковой индикации средней частоты импульсов с детекторов нейтронов и сигнализации о превышении установленной частоты импульсов с детекторов нейтронов в физических исследованиях.

Установка СПУ 1-1М может комплектоваться различными типами датчиков, а именно:

- датчиком НГД-2 с коронным счетчиком СНМ-11;
- датчиком НГД-3 с коронным счетчиком СНМ-12;
- датчиком НГД-4 с камерой деления КНТ-31.

6.4.3. Технические данные

Установка СПУ 1-1М обеспечивает:

- регистрацию числа импульсов, поступающих от детекторов, электромеханическим регистратором с объемом счета 1000 импульсов при введении предварительного пересчета на одно из следующих значений: 4; 16; 64; 256; 1024; 4096; 16384;

- звуковую индикацию приходящих импульсов громкоговорителем при средней частоте сигналов после указанного выше коэффициента пересчета до 15 имп/с;
- световую сигнализацию при достижении средней частотой сигналов после указанного коэффициента пересчета величины около 25 имп/с и 50 имп/с;
- выдачу команды (размыкание электрических контактов), при достижении средней частоты сигналов значения около 50 имп/с.

В установке обеспечивается плавная регулировка:

- громкости звука;
- порога срабатывания сигнализирующих каскадов в пределах 15–25 имп/с и 30–50 имп/с.

Установка обеспечивает дискриминацию по величине заряда импульсов, поступающих от детекторов, при длительности импульсов тока не более 0,1 мкс на уровне 0,5 амплитуды.

Чувствительность дискриминатора составляет $(0,15 \cdot 10^{-13} \pm 30 \%)$ Кл с возможностью закруглений:

- ступенчато в 2, 3, 4, 5...10 раз;
- восемью ступенями приблизительно в 1,5 раза (всего в 10 раз);
- скачками в 10 и 100 раз.

Установка позволяет регистрировать сигналы с детекторов при средней скорости счета до 80000 имп/с. Разрешающее время установки по входу не более 1,5 мкс.

Установка обеспечивает нормальную работоспособность в диапазоне температур от +10 до +35 °С и влажности до 80 %. Датчики установки работоспособны при температуре до +80 °С и влажности 80 %, а также при температуре до +40 °С и влажности 98 %.

Установка обеспечивает питание детекторов напряжением положительной полярности, изменяемым скачками и плавно в пределах от 300 до 2500 В при токе нагрузки 0 до 50 мкА.

Время непрерывной работы установки 24 ч. Время установления рабочего режима не более 30 мин.

Питание установки осуществляется от сети переменного тока частотой 50 ± 1 Гц, напряжением $(220 \pm 15 \%)$ В. Потребляемая мощность не более 75 Вт.

Масса и габариты блоков установки не превышают следующих значений:

- пульт СПУ-1-1М: 313 × 480 × 346 мм, масса 30 кг;
- блок предварительного усиления ПУ-2-1: L = 457 мм, Ø = 104 мм, масса 8 кг.

6.4.4. Принцип работы установки

Установка СПУ-1-1М состоит из следующих блоков:

- детектора НГД-2, НГД-3 или НГД-4;
- предусилителя ПУ-2-Г;
- блока интегрального дискриминатора БД-16-1;
- блока пересчетного БП-21 –1;
- блока сигнального БК-20-1;
- блока низковольтного питания БН-86-1;
- блока высоковольтного стабилизатора БВ-9-1.

Функциональная связь блоков установки и принцип работы поясняется функциональной схемой (см. рис. 6.4.1).

Регистрация плотности потока нейтронов осуществляется одним из датчиков НГД-2, НГД-3 или НГД-4, подключаемым к блоку предварительного усиления ПУ-2-1. Импульсы со счетчика (в датчиках НГД-2 и НГД-3) или с камеры деления (в датчике НГД-4) усиливаются по амплитуде и дискриминируются. Выходные сигналы, снимаемые с блока БД-16-1, нормализованы по амплитуде и длительности и их частота пропорциональна плотности потока нейтронов. Коэффициент усиления сигналов перед дискриминацией уменьшается скачком в 10 и 100 раз, а также ступенчато в пределах от 1:1 до 1:10. Порог дискриминации также ступенчато регулируется (меняется в 10 раз).

Сигналы с блока через пусковое устройство секундомера часов поступают на счетное устройство. Регистрация числа импульсов, поступивших от детектора за экспозицию, осуществляется электромеханическим счетчиком и предшествующими ему триггерными ячейками. Количество ячеек изменяется переключателем в пределах от 1 до 14 (от 4 до 16384). По индикаторным лампочкам счетного блока осуществляется интерполяция состояния счетных триггеров.

Импульсы со счетных триггеров поступают также на блок БК-20-1; частота этих импульсов отмечается по звуковому индикатору, включающему в себя нормализатор сигналов Н2, усилитель У2 и один или два громкоговорителя. Громкость звука регулируется переменным резистором R60.

Превышение порога частотой сигналов, поступающих на усилитель-ограничитель после определенного пересчета, отмечается двумя сигнальными устройствами. Каждое из этих устройств включает линейный интегратор И (измеритель скорости счета) и пороговый каскад ПК. Порог срабатывания первого из таких каскадов соответствует превышению частотой величины 15–25 имп/с, его превышение приводит к зажиганию предупредительной сигнализации. Порог срабатывания второго

каскада соответствует превышению частотой величины 30–50 имп/с, переход через него приводит к зажиганию лампочки аварийной сигнализации и срабатыванию исполнительного релейного каскада.

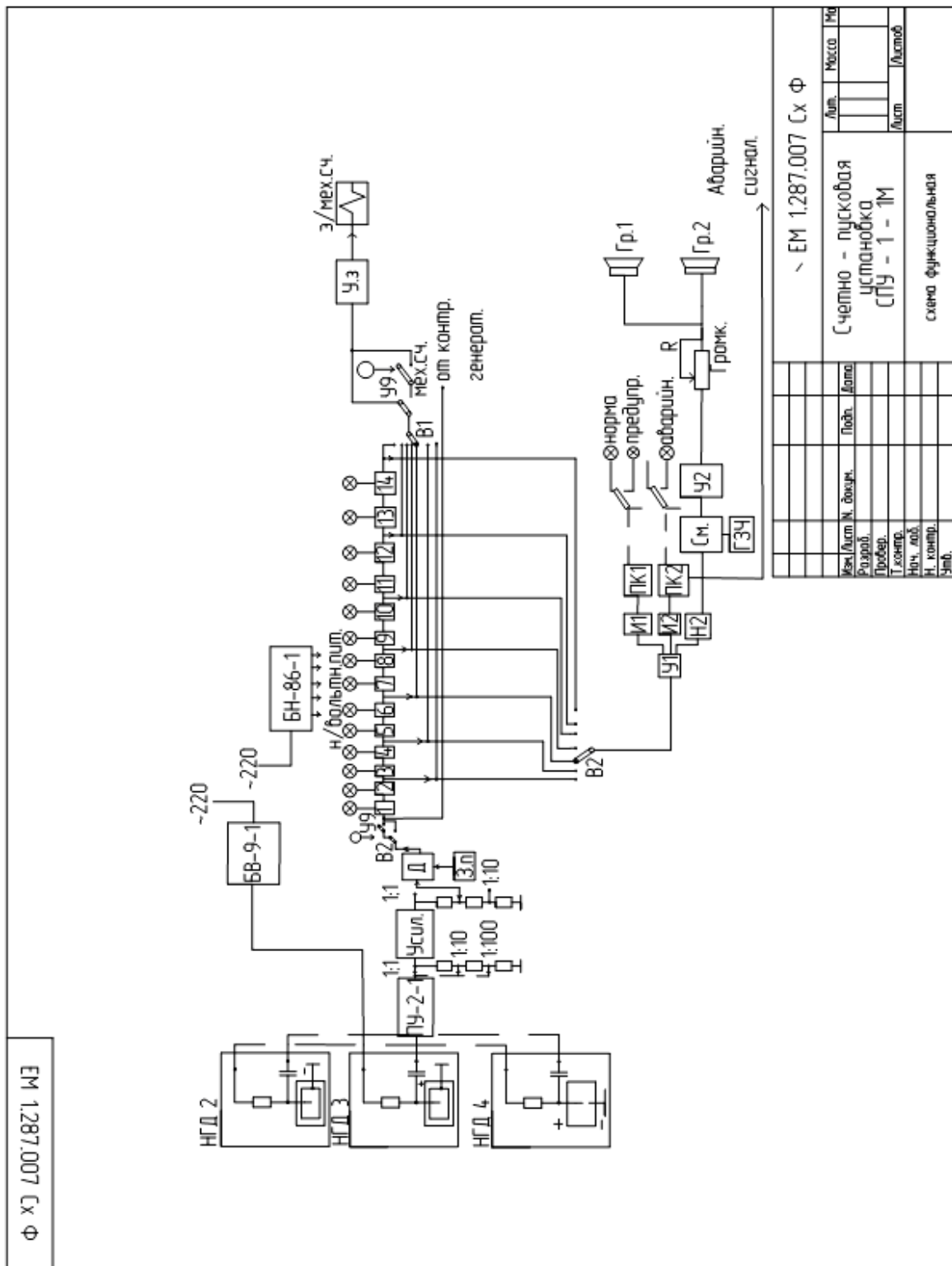


Рис. 6.4.1. Функциональная схема счетно-пусковой установки СПУ-1-1М

Питание электронных каскадов осуществляется от блока низковольтного питания БН-86-1. Питание счётчиков в детекторах производится от высоковольтного блока БВ-9-1.

Каждый из датчиков включает в себя детектор нейтронов, нагрузочный резистор R1 и переходной конденсатор С1. Питание детекторов высоким напряжением осуществляется через высоковольтный разъём Ш1, сигналы с детекторов снимаются также через разъём Ш1. Резистор R1 и конденсатор С1 по конструктивным соображениям размещены в блоке предварительного усиления ПУ-2-1. Основные радиометрические параметры детекторов нейтронов, используемых в датчиках установки, показанные в табл. 6.4.1, следующие:

Таблица 6.4.1

Датчик	НГД-2	НГД-3	НГД-4
Тип счётчика	СНМ-11	СНМ-12	СНМ-31
Чувствительность (имп/нейтр/см ²)	1,2	0,3	0,25
Фон, им/мин при Д = 1000 Р/час	1	2	–
Изменение чувствительности при Д = 1000 Р/час	<25 %	<30 %	
Изменение чувствительности при Т = 80 °С	<6 %	<12 %	
Наклон плато, % на 100 В	<1,5	<5	

Блок предварительного усиления ПУ-2-1 состоит из двух узлов: фазоинвертора и усилителя импульсов тока.

Блок интегрального дискриминатора БД-16-1 состоит из шести узлов: входного аттенюатора, двух идентичных усилителей, двух промежуточных аттенюаторов и дискриминатора тока.

Блок пересчетный БП-21-1 включает семь пересчетных узлов (каждый из которых состоит из двух триггеров) и узел запуска электромеханического регистратора. Ориентация счетных триггеров в нулевом состоянии осуществляется кнопкой СБРОС.

Блок сигнальный БК-20-1 состоит из узла измерителя средней скорости счета, двух сигнально-пороговых каскадов, узла звуковой индикации и контрольного генератора.

Блок высоковольтного стабилизатора БВ-9-1 включает узел высоковольтного выпрямителя, источник опорного выпрямителя и стабилизатор.

Блок низковольтного питания БН-86-1 включает группу выпрямителей и стабилизаторов напряжений, обеспечивающих питание электронных узлов прибора.

6.4.5. Подготовка прибора к работе

1. Прежде чем приступить к работе с установкой, необходимо тщательно изучить техническое описание, знать устройство, принцип работы отдельных блоков и всей установки в целом.

2. Исходным состоянием установки является такое, когда тумблеры СЕТЬ и ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ на блоке низковольтного питания находятся в положении «Выключено», а переключатели находятся в следующих положениях:

- РЕЖИМ РАБОТЫ блока пересчетного – в положении СЧЕТНАЯ СХЕМА;
- РЕЖИМ блока сигнального в положении РАБОТА;
- ГРОМКость блока сигнального – в крайнем левом положении;
- РЕГУЛИРОВКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ – в положении «0.3».

3. Для включения установки необходимо перевести тумблер блока БН-86-1 в положение СЕТЬ, при этом должны загореться сигнальная лампочка в блоке питания и индикаторная лампочка НОРМАЛЬНО в блоке сигнальном.

4. Убедиться в правильности работы пересчетной схемы. Для этого установить переключатель РЕЖИМ блока сигнального в положение КОНТРОЛЬ, 1 Гц. Нажатием пусковой кнопки секундомера пустить счетную схему. Синхронно с увеличением числа импульсов, зарегистрированных триггерами счетного блока, в громкоговорителе должны быть щелчки. Сосчитать таким образом не менее 128 импульсов.

5. Проверить работу каскада запуска электромеханического счетчика и последних триггеров счетной схемы. Для этого переключатель РЕЖИМ перевести в положение КОНТРОЛЬ, 50 Гц, а переключатель КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕСЧЕТА – в положение «4». Нажатием кнопки СБРОС перевести триггеры в нулевое состояние и сбросить в нуль электромеханический регистратор. Нажатием кнопки секундомера включить счетную схему и провести регистрацию в течение 60 с. По индикаторным лампочкам отметить число сосчитанных импульсов, которое должно быть близко к 3000. Число импульсов, зарегистрированных электромеханическим счетчиком, должно быть в 4 раза меньше.

6. Перевести переключатель РЕЖИМ в положение КОНТРОЛЬ, 1000 Гц, переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА в положение «256», а переключатель КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕСЧЕТА – в положение «16384». Провести измерения в течение 100 секунд. По электромеханическому счетчику должно быть сосчитано 5–7 импульсов. В громкоговорителе должны быть щелчки с частотой около 4 Гц.

7. Проверить работу каскадов сигнализации. Для этого нажать на кнопку ДЕБЛОКИРОВКА и убедиться в том, что в сигнальном блоке горит только лампочка НОРМАЛЬНО. Оставив переключатель РЕЖИМ в положении КОНТРОЛЬ, 1000 Гц, переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА перевести в положение «1б». При этом должны загореться индикаторные лампочки ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНАЯ и АВАРИЙНАЯ, а лампочка НОРМАЛЬНО должна погаснуть.

8. Завести секундомер и установить переключатели в рабочие положения, а именно:

- РЕЖИМ РАБОТЫ блока пересчетного – в положение МЕХАНИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК;
- РЕЖИМ блока сигнализации – в положение РАБОТА.

Переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА и одноименный регулятор потенциометра должны быть установлены в положения, соответствующие выбранному порогу сигнализации, отмеченному в формуляре. Переключателем и регулятором высокого напряжения установить по вольтметру напряжение питания, выбранное для данного детектора.

6.4.6. Порядок работы

1. Счетно-пусковая установка СПУ-1-1М рассчитана на использование:

- при пусковых работах для контроля нарастания плотности потока нейтронов;
- в качестве индикаторно-сигнализационной при оценке изменения плотности потока нейтронов.

2. При пусковых работах при помощи установки осуществляется непрерывная индикация уровня плотности потока нейтронов, а также производится контроль за относительным изменением плотности потока нейтронов.

2.1. Для индикации уровня плотности потока нейтронов переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ блока пересчетного установить в положение МЕХАНИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК, при этом пусковая кнопка секундомера осуществляет переключение цепи запуска электромеханического счетчика, а регистрация импульсов триггерными ячейками происходит непрерывно. Переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА блока сигнального установить в положение «4», при этом в громкоговорителе должны быть щелчки с частотой 4 Гц. После возрастания частоты щелчков до 10...15 Гц переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА перевести в следующее положение «1б», при котором частота щелчков понижается в 4 раза. Затем после возрастания плотности потока переключатель перевести в положение «64» и т. д.

2.2. Сигнализация превышения частотой сигналов с детектора установленного порога осуществляется лампочками сигнального блока. Величина порога может изменяться регулятором ПЛАВНО в пределах 15–25 имп/с для предупредительной и 30–50 имп/с для аварийной сигнализации. Лампочка предупредительной сигнализации зажигается при превышении частоты с учетом вводимого пересчета (положение переключателя РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА) установленного значения. При снижении частоты сигналов лампочка ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНАЯ гаснет и вновь зажигается лампочка НОРМАЛЬНО. При выключении аварийной сигнализации срабатывает релейное устройство пульта. Система остается в таком состоянии и после снижения частоты сигналов, приходящих на каскады сигнализации. Возврат её в исходное положение осуществляется нажатием кнопки ДЕБЛОКИРОВКА.

2.3. При оценке уровня плотности потока нейтронов необходимо сбросить в нулевое положение секундомер и электромеханический регистратор. Переключатель КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕСЧЕТА перевести в такое положение, чтобы одноименная индикаторная лампочка меняла свое состояние 3–5 раз в секунду. Нажать пусковую кнопку секундомера и провести измерение поступающего на электромеханический счетчик числа импульсов за время T (например, за 60 или 100 сек). Число импульсов, зарегистрированное электромеханическим счетчиком, не должно быть меньше 200, во избежание существенной погрешности.

Скорость счета n определяется как NK / T , где N – показания электромеханического счетчика, K – установленный коэффициент пересчета.

Плотность потока нейтронов можно оценить как n/η , где η – чувствительность в имп/нейтр/см², устанавливается при калибровке детектора, изложенной в разделе «Настройка».

3. При использовании установки для сигнализации о превышении установленного уровня плотности потока нейтронов, переключатель РЕЖИМ РАБОТЫ установить в положение МЕХАНИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК, а переключатель РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА сигнального блока в положение, соответствующее выбранному пороговому значению величины плотности нейтронов Φ_0 . Ориентировочно это значение может быть определено как $(15...25) K/\eta$ – для предупредительной и $(30...50) K / \eta$ – для аварийной сигнализации, где K – положение переключателя РЕГУЛИРОВКА ПОРОГА. Плавная регулировка порога схемы сигнализации осуществляется ручной регулировкой.

6.4.7. Настройка

1. Для каждого из детекторов, используемых в датчиках, существует оптимальное напряжение питания, а также оптимальный уровень дискриминации сигналов, обеспечивающий низкий уровень фоновой скорости счета при достаточной эффективности регистрации нейтронов. Для установки оптимального рабочего режима датчиков в пульте имеется ряд органов настройки, а именно:

- регуляторы напряжения питания;
- регуляторы порога дискриминации и аттенюации сигнала.

2. Напряжение питания датчиков устанавливается переключателем и ручкой плавной регулировки высокого напряжения с контролем по вольтметру. Напряжение должно соответствовать указанному в паспорте (1600 В для счетчика СНМ-11, 500 В для счетчика СНМ-12, 500–600 В для камеры деления КНТ-31).

3. При использовании датчика НГД-2 со счетчиком СНМ-11 высокочастотный кабель от предусилителя рекомендуется подключать к разъему с аттенюацией «1:10». При использовании датчика НГД-3 со счетчиком СНМ-12 кабель подключается к разъему с градуировкой «1:100», а при использовании датчика НГД-4 с камерой деления КНТ-31 – к разъему с градуировкой «1:1».

4. Установка положения переключателей **ПОРОГ ДИСКРИМАЦИИ** и **АТТЕНЮАЦИЯ СИГНАЛА** осуществляется следующим образом: ручка переключателя **АТТЕНЮАЦИЯ СИГНАЛА** устанавливается в положение «1» (с наибольшей чувствительностью дискриминатора). При этом должна наблюдаться высокая скорость счета сигналов с детектора, обусловленная собственными шумовыми импульсами. Переключая **ПОРОГ ДИСКРИМИНАЦИИ** по часовой стрелке, следует добиться фоновой скорости счета:

- порядка 5 импульсов для детектора НГД-4 (с камерой деления),
- порядка 15 импульсов для детектора НГД-2 и НГД-3.

Если ослабления фоновой скорости не наблюдается вплоть до порога дискриминации «3», необходимо дальнейшее ослабление амплитуды сигнала осуществлять ручкой переключателя **АТТЕНЮАЦИЯ СИГНАЛА**.

После определения точки с номинальной фоновой скоростью счета установить рабочую точку. Для этого при использовании датчиков НГД-2 или НГД-3 следует осуществить дополнительную аттенюацию сигнала в 2–3 раза.

При использовании детектора НГД-4 с камерой деления следует увеличивать порог дискриминации, изменяя скорость счета фона в каж-

дом положении переключателя. Положение переключателя, при котором скорость счета фона спадает до величин, равных или меньших 1 имп/мин, считать рабочим.

5. Необходимо учитывать, что при повышении порога дискриминации в коронных счетчиках и, в особенности, камере деления снижается эффективность регистрации нейтронов. В коронных счетчиках эффективность регистрации снижается приблизительно на 1 %. Для камеры деления при снижении фоновой скорости счета от 1 имп/с до 1 имп/мин эффективность снижается приблизительно вдвое. При высоких потоках скорость счета может быть понижена увеличением порога дискриминации или соответствующей аттенуацией.

6. При калибровке детекторов по чувствительности необходимо иметь следующее оборудование: шаровой источник тепловых нейтронов, включающий набор образцовых изотопных альфа – бериллиевых π -источников быстрых нейтронов; кадмиевый экран; градуировочную линейку.

Чувствительность детектора определяется в одной точке при скорости порядка 10–20 имп/с.

При определении скорости счета n временная экспозиция выбирается такой, чтобы по пересчетному прибору набиралось не менее 2000 импульсов. Плотность потока тепловых нейтронов на расстоянии $R + R_{\text{ЭФ}}$ от центра шарового источника вычисляется по формуле:

$$\Phi_0 = (W \cdot K \cdot F_a \cdot F_T) / 4\pi(R + R_{\text{ЭФ}})^2, \quad (1)$$

где W – внешнее нейтронное излучение изотопного альфа – бериллиевого источника (нейтрон/с); K – отношение внешнего излучения тепловых нейтронов шарового источника нейтронов к внешнему излучению альфа – бериллиевого источника; F_a – коэффициент, учитывающий угловое распределение тепловых нейтронов шарового источника. При использовании образцовых изотопных источников принято считать значение коэффициента $F_a = 1$; F_T – коэффициент, учитывающий температуру распределения тепловых нейтронов.

Коэффициент F_T вычисляется по соотношению:

$$F_T = \frac{(1 - e^{-N_0 v_0})}{(1 - e^{-N_0 v})}, \quad (2)$$

где N_0 – число ядер в детекторе на 1 см^2 , вступающих во взаимодействие с тепловыми нейтронами; v и v_0 – сечения захвата этими ядрами тепловых нейтронов с наиболее вероятной скоростью 2200 м/с и скоростью 2550 м/с, соответственно.

Для детекторов с поверхностной плотностью $N_0 v_0 \gg 1$ и $N_0 v_0 \ll 1$ коэффициент F_T равен 1 и 1,155, соответственно, в остальных случаях его значения лежат в интервале $1 < F_m < 1,155$; R , м – расстояние от гео-

метрического центра шарового источника до передней торцевой поверхности блока детектирования; $R_{\text{эф}}$, м – расстояние от передней поверхности блока детектирования до эффективного центра детектора. Положение $R_{\text{эф}}$ определяется экспериментально. Для этого при различных расстояниях R между центром шарового источника и передней торцевой поверхностью блока детектирования измеряется кадмиевая разность показаний прибора:

$$\bar{N} - N_{\text{к}} = \bar{N} (1 - 1/C), \quad (3)$$

где C – кадмиевое отношение, равное отношению показаний прибора при измерениях без кадмиевого экрана и с экраном. Показания прибора определяются по числу импульсов в течение одинакового времени в отсутствие кадмиевого экрана и с экраном, соответственно; \bar{N} – показания прибора без кадмиевого экрана.

После проведения измерений строится график зависимости $1 / \sqrt{\bar{N} - N_{\text{к}}} = f(R)$ и через линейную часть кривой проводится линия до пересечения с осью абсцисс.

В месте пересечения этой прямой с графиком зависимости $1 / \sqrt{\bar{N} - N_{\text{к}}}$ находится расстояние $R_{\text{эф}}$, а в точке пересечения прямой с осью абсцисс – эффективный центр $R_{\text{эф}}$.

После вычисления расчетного значения нейтронного потока в заданной точке определяется чувствительность детектора:

$$\eta = n / \Phi_0.$$

6.4.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Привести краткое изложение назначения прибора, его основных технических характеристик, область применения.
3. Описание принципа работы прибора с использованием структурной схемы.
4. Произвести настройку установки с одним датчиком типа НГД-2 со счетчиком СНМ-11.
5. Произвести измерения плотности потока тепловых нейтронов и определить чувствительность детектора.

6.4.9. Контрольные вопросы

1. Принцип работы датчика с коронным счетчиком.
2. Пояснить структурную схему прибора.
3. Пояснить назначение блоков, входящих в состав установки.
4. Дать понятие плотности потока нейтронов и чувствительности детектора.

ГЛАВА 7. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРИБОРЫ ДОЗИМЕТРИИ

7.1. Изучение дозиметра «Белла»

7.1.1. Цель работы

Целью данной лабораторной работы является изучение устройства дозиметра «Белла», его технических характеристик, порядка подготовки его к работе и проведения измерений мощности эквивалентной и экспозиционной дозы.

7.1.2. Общие сведения

1. Структурные схемы дозиметрических приборов

Значение дозы и мощности дозы излучения можно определить приборами, основанными на различных методах и выполненными по разным структурным схемам.

Первый способ построения дозиметров использует изменения в строении вещества детектора под действием ионизирующих излучений (радиационно-химические изменения состава и строения вещества). К таким устройствам относятся химические дозиметры, фотодозиметры и т. п. Однако эти устройства не являются электронно-измерительными приборами и пригодны для определения значения дозы начиная от единиц рад.

Другой способ построения дозиметрической аппаратуры основан на измерении суммарного электрического заряда, который протекает в цепи пропорционального детектора, вызван действием ионизирующего излучения и непосредственно связан с энергией, переданной веществу детектора. Интегрирование элементарных зарядов, создаваемых при воздействии отдельных частиц или квантов, производится в нагрузочной цепи детектора. Измерение суммарного заряда позволяет определить значение дозы, а измерение тока в цепи детектора – значение мощности дозы. На рис. 7.1.1, *а* и *б* приведены структурные схемы устройств такого типа. Они содержат блоки детектирования ионизирующего излучения D с блоком высоковольтного питания. Сигнал, возникающий в цепи детектора, измеряется регистратором P с аналоговым входом: электрометром или цифровым электрометром – при определении значения заряда и измерителем постоянного тока или цифровым измерителем постоянного тока – при определении значения тока.

Дозиметрические устройства, выполняемые по такой структурной схеме, можно разделить на конструктивные части: из них выделяют

элемент или группу элементов, находящихся непосредственно в месте воздействия облучения, а часть аппаратуры (пульт) находится вне поля излучения. Так, например, в устройствах, определяющих значение дозы по заряду, образованному в ионизационной камере, измерение проводят в два этапа: сначала возникающий под действием излучения заряд интегрируется на накопительной ёмкости C , а затем величина этого заряда определяется регистратором. Аналогично в устройствах, использующих эффекты накопления энергии, превращаемой затем в электрический сигнал (например, термолюминесцентные дозиметры), из блока детектирования можно выделить детектор (люминофор), который подвергается действию излучения. Затем его соединяют с остальным устройством и при определенном воздействии испускаются кванты света, которые преобразуются фотоумножителем в электрический сигнал, пропорциональный значению дозы.

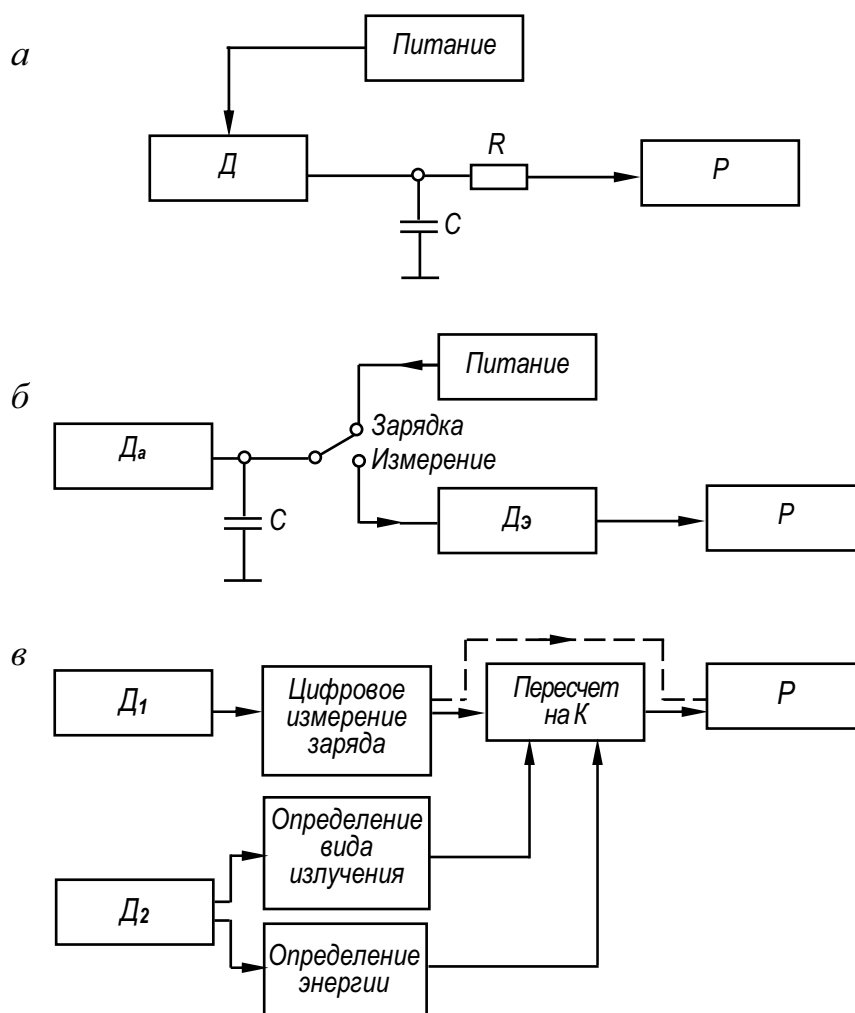


Рис. 7.1.1. Структурные схемы построения дозиметрической аппаратуры

Третий способ построения дозиметрической аппаратуры основан на использовании дискретного режима работы пропорционального детектора. Структурная схема таких приборов приведена на рис. 7.1.1, в. Сигналы с детектора D поступают на устройство цифрового измерения заряда, которое генерирует импульсы, пропорциональные по числу амплитуде измеряемых сигналов (т. е. энергии, переданной детектору каждой частицей или квантом). При измерении значения дозы, пропорциональной суммарному количеству этих импульсов, их число определяется дискретным регистратором суммирующего типа – счётчиком импульсов; при измерении мощности дозы в качестве регистратора используется измеритель скорости счёта.

Интегрирование информации в регистраторе позволяет учитывать характер действующего излучения (его вид, энергию) при регистрации создаваемого им единичного заряда. Таким способом можно измерять дозу излучения.

2. Единицы дозы

Рад – единица поглощенной дозы, при которой количество поглощенной энергии в 1 г любого вещества равно 100 эрг независимо от вида и энергии ионизирующего излучения. Производными единицами являются миллирад (мрад) и микрорад (мкрад):

$$\begin{aligned}1 \text{ мрад} &= 10^{-3} \text{ рад} = 0,1 \text{ эрг/г}, \\1 \text{ мкрад} &= 10^{-6} \text{ рад} = 0,0001 \text{ эрг/г}.\end{aligned}$$

Рентген (R) – единица экспозиционной дозы рентгеновского или гамма-излучения, при которой сопряжённая корпускулярная эмиссия на 0,001293 г воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу (1 СГСЭ) количества электричества каждого знака (0,001293 г – это масса 1 см³ атмосферного воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.). Производными от единицы рентгена являются миллирентген (мР) и микрорентген (мкР):

$$1R = 10^3 \text{ мР} = 10^6 \text{ мкР}.$$

Бэр – единица измерения эквивалентной дозы. За один бэр принимается такая поглощённая доза любого вида излучения, которая при хроническом облучении вызывает такой же биологический эффект, что и 1 рад рентгеновского или гамма-излучения.

горизонтальная отдельно

Таблица 7.1.1

Соотношения между единицами СИ и внесистемными единицами активности и характеристик поля излучения

Величина и её символ	Название и обозначение единиц		Связь между единицами
	Единица СИ	Внесистемная единица	
Активность A	Беккерель (Бк), равный одному распаду в секунду (расп./с)	Кюри (Ки)	$1 \text{ Ки} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ расп./с} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Бк};$ $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп./с};$ $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп./с} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$
Плотность потока I или тока J_E энергии частиц	Ватт на квадратный метр (Вт/м ²), равный одному джоулю на квадратный метр в секунду [Дж/(м ² ·с)]	Эрг на квадратный сантиметр в секунду [эрг/(см ² ·с)] или мегаэлектрон-вольт на квадратный сантиметр в секунду [МэВ/(см ² ·с)]	$1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2;$ $1 \text{ Вт}/\text{м}^2 = 1 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^3 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с});$ $1 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 1,602 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1,602 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}/\text{м}^2;$ $1 \text{ Вт}/\text{м}^2 = 1 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 6,24 \cdot 10^8 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
Поглощённая доза D	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	Рад (рад)	$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг}/\text{г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/\text{кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр};$ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж}/\text{кг} = 10^4 \text{ эрг}/\text{г} = 100 \text{ рад}$
Мощность поглощённой дозы \dot{D}	Грэй в секунду (Гр/с), равный одному джоулю на килограмм в секунду [Дж/(кг·с)]	Рад в секунду (рад/с)	$1 \text{ рад}/\text{с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}/\text{с};$ $1 \text{ Гр}/\text{с} = 1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^2 \text{ рад}/\text{с}$
Эквивалентная доза H	Зиверт (Зв), равный одному грэю на коэффициент качества $1 \text{ Зв} = [1 \text{ Гр}/k = 1 \text{ (Дж/кг)}/k]$	Бэр (бэр)	$1 \text{ бэр} = (1 \text{ рад})/k = (1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/\text{кг})/k = (1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр})/k = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв};$ $1 \text{ Зв} = (1 \text{ Гр})/k = (1 \text{ Дж}/\text{кг})/k = (100 \text{ рад})/k = 100 \text{ бэр}$
Мощность эквивалентной дозы \dot{H}	Зиверт в секунду (Зв/с)	Бэр в секунду (бэр/с)	$1 \text{ бэр}/\text{с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}/\text{с};$ $1 \text{ Зв}/\text{с} = 100 \text{ бэр}/\text{с}$
Экспозиционная доза X	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/\text{кг}$ (точно); $1 \text{ Кл}/\text{кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$ (приближённо)
Мощность экспозиционной дозы \dot{X}	Кулон на килограмм в секунду [Кл/(кг·с)]	Рентген в секунду (Р/с)	$1 \text{ Р}/\text{с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ (точно); $1 \text{ Кл}/(\text{кг} \cdot \text{с}) = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}/\text{с}$ (приближённо)
Керма K	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	Рад (рад)	$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг}/\text{г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/\text{кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр};$ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж}/\text{кг};$ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж}/\text{кг} = 1 \cdot 10^4 \text{ эрг}/\text{г} = 100 \text{ рад}$
Мощность кермы \dot{K}	Грэй в секунду (Гр/с), равный одному джоулю на килограмм в секунду [Дж/(кг·с)]	Рад в секунду (рад/с)	$1 \text{ рад}/\text{с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}/\text{с};$ $1 \text{ Гр}/\text{с} = 1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с}) = 1 \cdot 10^2 \text{ рад}/\text{с}$

3. Нормы дозы для защиты от излучений

Таблица 7.1.2

Мощность эквивалентной дозы, используемая при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения

Категория облучаемых лиц		Назначение помещений и территорий	Продолжительность облучения, час/год	Проектная мощность эквивалентной дозы, мкЗв/час
Персонал	Группа А	Помещения постоянного пребывания персонала	1700	6,0
		Помещения временного пребывания персонала	850	12
	Группа Б	Помещения организации и территория санитарно-защитной зоны, где находится персонал группы Б	2000	1,2
Население		Любые другие помещения и территории	8800	0,06

- Примечания.
1. В таблице приведены значения предела мощности дозы от техногенных источников излучения, имеющих в организации.
 2. Переход от измеряемых значений эквивалентной дозы к эффективной дозе проводится по специальным методическим рекомендациям. При расчёте защиты с коэффициентом запаса, равным 2, проектная мощность эквивалентной дозы излучения H на поверхности защиты определяется по формуле:

$$H = 500 \times D/t, \text{ мкЗв/час,}$$

где D – предел дозы для персонала или населения, мЗв в год;

t – продолжительность облучения, часов в год.

Таблица 7.1.3

Основные пределы доз

Нормируемые величины *	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год		
– в хрусталике глаза ***	150 мЗв	15 мЗв
– в коже ****	500 мЗв	50 мЗв
– в кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Примечания. * Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы Б, равны 1/4 значений для группы А.

*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см².

**** Относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см² под покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см². Допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усреднённого облучения любых 15 см² кожи этот предел не будет превышен.

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

7.1.3. Назначение

Дозиметр бытовой «Белла» предназначен для обнаружения и оценки с помощью звуковой сигнализации интенсивности гамма-излучения, а также для измерения мощности полевой эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения по цифровому табло.

Дозиметр «Белла» применяется для оперативного индивидуального контроля населением радиационной обстановки.

Принципиальная схема дозиметра «Белла» представлена на рис. 7.1.2.

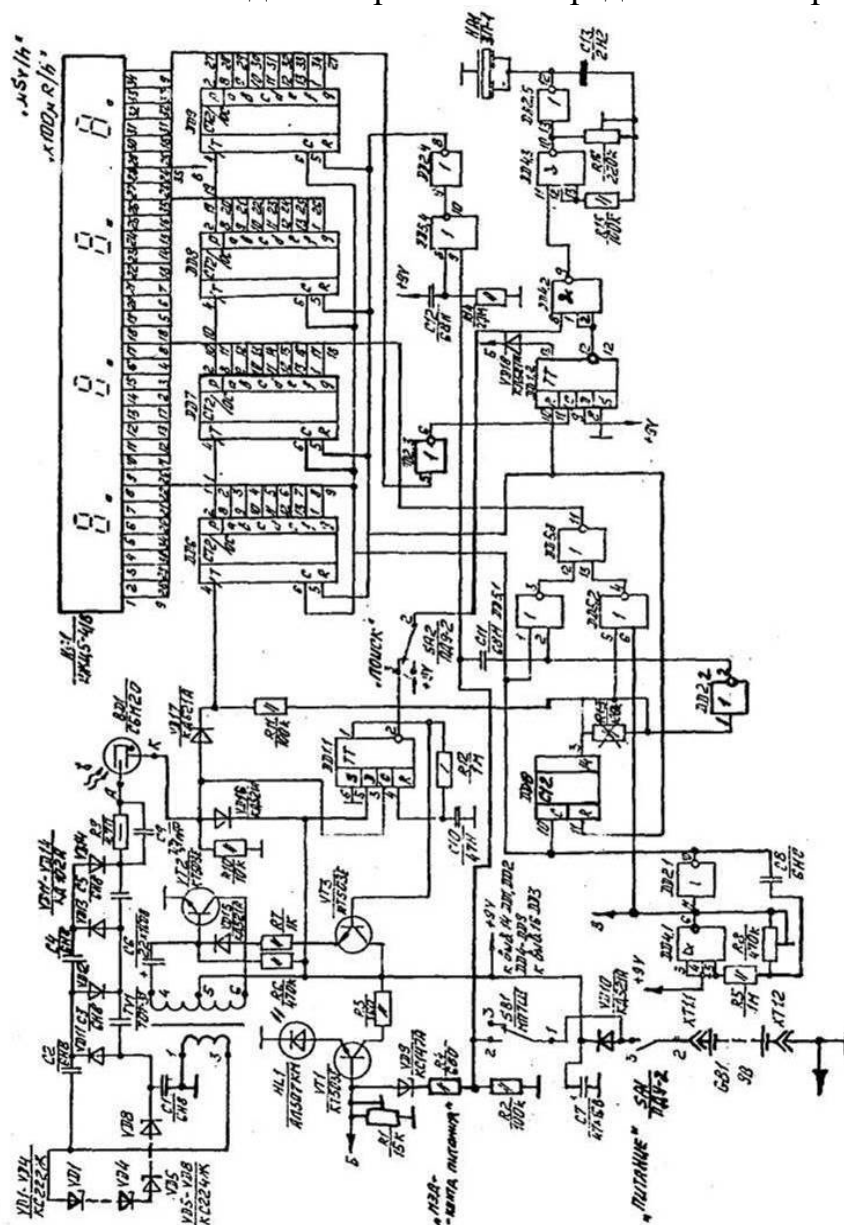


Рис. 7.1.2. Схема электрическая принципиальная дозиметра «Белла»

7.1.4. Технические характеристики

Дозиметр предназначен для эксплуатации при температуре от 0 до +40 °С, относительной влажности до 80 %, атмосферном давлении 84...106 кПа (630...800 мм рт. ст.).

Диапазон энергий излучения, МэВ 0,05...1,25.

Диапазон измерения мощности: эквивалентной дозы, мкЗв/ч ($\mu\text{Sv/h}$) 0,20...99,99; экспозиционной дозы, мкР/ч ($\mu\text{R/h}$) 20...9999.

Основная погрешность измерения МЭД, %: $\pm(30 + 4/P)$, где P – измеренная МЭД в мкЗв/ч.

Энергетическая зависимость, % ± 30 .

Дополнительная погрешность измерения МЭД, % на 10 °С ± 10 .

Время установления рабочего режима, с, не более: 10.

Время измерения МЭД, с, не более 45.

Время непрерывной работы при естественном радиационном фоне без смены батареи, ч, не менее: 200.

Уровень звукового сигнала, подаваемого дозиметром на расстоянии 15 см, дБ, не менее: 65.

Назначенный срок службы, лет, не менее: 9.

Габаритные размеры дозиметра, мм, не более: 36 × 66 × 155.

Масса дозиметра, кг, не более: 0,25.

Содержание драгоценных металлов, г: золото – 0,056; серебро – 0,254.

7.1.5. Краткое описание дозиметра

Дозиметр «Белла» выполнен в виде портативного, носимого в кармане одежды прибора и предназначен для обнаружения и оценки с помощью звуковой сигнализации интенсивности гамма-излучения, а также для измерения МЭД гамма-излучения по цифровому жидкокристаллическому табло.

Корпус дозиметра изготовлен из ударопрочного полистирола.

В дозиметре предусмотрена возможность контроля напряжения батареи питания.

Дозиметр имеет два режима работы: ПОИСК и МЭД.

- Режим ПОИСК служит для грубой оценки радиационной обстановки по частоте следования звуковых сигналов.

- Режим МЭД служит для измерения мощности эквивалентной дозы по цифровому табло.

Измерение МЭД осуществляется автоматически с интервалом времени около 40 с, или вручную, путем кратковременного нажатия на кнопку МЭД – КОНТР. ПИТАНИЯ.

Время измерения около 40 секунд, при этом на цифровом табло после каждого разряда (цифры) индицируются точки.

Исчезновение точки после 1, 2, 3 разрядов сигнализирует об окончании процесса измерения.

Дозиметр обеспечивает непрерывную звуковую и световую сигнализацию о превышении верхнего предела диапазона измерения 99,99 мкЗв/ч (переполнение цифрового табло) до значения мощности эквивалентной дозы не более 1,0 мЗв/ч.

7.1.6. Подготовка дозиметра к работе

1. Установите выключатель питания и режима ПОИСК в положение отключено (нижнее положение).

2. Установите батарею типа «Корунд» (из комплекта поставки) в отсек питания дозиметра.

3. Включите дозиметр, для чего выключатель питания переведите в положение ПИТАНИЕ.

4. Убедитесь в том, что напряжение батареи питания находится не ниже минимального допустимого значения, для чего нажмите на кнопку МЭД-КОНТР. ПИТАНИЯ. При этом должен загореться индикатор напряжения батареи питания.

ВНИМАНИЕ! Отсутствие свечения индикатора напряжения батареи питания при нажатии на кнопку информирует, что батарея разрядилась и требуется её замена.

5. Выключение питания дозиметра осуществляется переводом выключателя питания в нижнее положение, при этом информация на цифровом табло исчезает не мгновенно, а спустя несколько секунд.

7.1.7. Порядок работы с дозиметром

1. Работа в режиме ПОИСК

1.1. Подготовьте дозиметр к работе согласно раздела 5.

1.2. Включите дозиметр, при этом на цифровом табло должны индицироваться нули.

1.3. Включите режим ПОИСК, для чего выключатель переведите в положение ПОИСК.

1.4. При естественном фоновом излучении дозиметр должен подавать 10–60 звуковых сигналов в минуту. С увеличением интенсивности гамма-излучения пропорционально возрастает частота следования звуковых сигналов.

2. Работа в режиме измерения МЭД

2.1. Подготовьте дозиметр к работе согласно разделу 5.

Измерение МЭД можно производить в любом положении выключателя ПОИСК, при этом в нижнем положении выключателя ПОИСК звуковая сигнализация отключается.

2.2. Включите дозиметр, при этом на цифровом табло должны индицироваться нули и точки после каждого разряда (цифры).

Наличие точек после каждого разряда (цифры) говорит о том, что происходит измерение МЭД. При этом показания на цифровом табло дозиметра будут изменяться.

2.3. Измерение МЭД длится около 40 секунд. Затем точки после 1, 2, 3 разрядов исчезнут, измерение МЭД закончится, показания дозиметра перестанут изменяться и на его табло будет сохраняться измеренное значение МЭД.

2.4. Показания на табло дозиметра будут сохраняться в течение около 40 секунд, после чего они автоматически сбросятся в нуль, опять появятся точки после каждой цифры и начнётся следующий замер МЭД и т. д.

2.5. Измерение МЭД можно начать в любой момент, не дожидаясь окончания предыдущего замера или не дожидаясь автоматического начала следующего замера. Для этого необходимо кратковременно нажать кнопку МЭД-КОНТР.ПИТАНИЯ. При этом появятся точки после каждого разряда (цифры) и начинается измерение МЭД, которое также будет длиться около 40 секунд.

Примечание: Так как дозиметр начинает измерять МЭД с заданной точностью через 10 секунд после включения, первый замер при автоматическом режиме необходимо не учитывать, либо по прошествии не менее 10 секунд после включения дозиметра необходимо кратковременно нажать кнопку МЭД-КОНТР. ПИТАНИЯ, при этом время измерения будет отсчитываться с момента нажатия кнопки.

2.6. Для более точного определения МЭД внешнего гамма-излучения необходимо снять не менее 5 показаний МЭД и вычислить среднее арифметическое значение путём деления суммы всех показаний на их количество.

Для получения значения МЭД в мкР/ч ($\mu\text{R/h}$) необходимо показания дозиметра умножить на 100.

2.7. Если в процессе измерения МЭД значение МЭД превысит 99,99 мкЗв/ч, то при любом положении выключателя ПОИСК сработает непрерывная звуковая и световая сигнализация.

7.1.8. Требования безопасности

Требования безопасности при подготовке и проведении измерений дозы и мощности дозы должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.0–75, ГОСТ 12.1.019–79, ГОСТ 12.0.004–79, «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99», «Нормам радиационной безопасности (НРБ-99)», «Правилам электробезопасности при эксплуатации испытательных станций и лабораторий предприятий и научно-исследовательских институтов», «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей», действующим инструкциям по мерам безопасности.

Процесс измерений дозы и мощности дозы должен быть отнесён к особо вредным условиям труда.

7.1.9. Содержание отчета по лабораторной работе

1. Краткое изложение принципа работы дозиметра, его основных технических характеристик, области применения, привести блок-схему прибора.

2. Провести калибровку дозиметра и привести результаты измерений.

7.1.10. Контрольные вопросы

1. Дать определения экспозиционной и поглощённой дозы.

2. Объяснить принцип работы дозиметра.

3. Объяснить принцип работы схемы измерения дозы и измерения мощности дозы.

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1987. – 392 с.
2. Юдин М.Ф. Дозиметрия фотонного излучения. – М.: Госстандарт, 1970. – 280 с.
3. Дозиметр «Белла»: Руководство по эксплуатации еМ2.805.010РЭ.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99. – М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с.

7.2. Изучение дозиметра ДБГ-06Т и измерение мощности эквивалентной и экспозиционной дозы

7.2.1. Цель работы

Целью настоящей работы является изучение устройства дозиметра ДБГ-06Т, его технических характеристик, порядка подготовки его к работе и проведение измерений мощности эквивалентной и экспозиционной дозы.

7.2.2. Назначение

Дозиметр ДБГ-06Т – носимый дозиметр мощности эквивалентной дозы окружающей среды и мощности экспозиционной дозы фотонного излучения с цифровой индикацией показаний.

Дозиметр предназначен для измерения мощности эквивалентной дозы окружающей среды или мощности экспозиционной дозы на рабочих местах, в смежных помещениях и на территории предприятий, использующих радиоактивные вещества и другие источники ионизирующих излучений, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения. Также дозиметр может использоваться для контроля эффективности биологической защиты, радиоактивных отходов и для оценки радиационной обстановки.

Дозиметр применяется для оперативного группового контроля мощности эквивалентной дозы окружающей среды или мощности экспозиционной дозы работниками служб радиационной безопасности, дефектоскопических лабораторий и т. д.

7.2.3. Технические характеристики

Дозиметр обеспечивает измерение мощности эквивалентной дозы окружающей среды и мощности экспозиционной дозы фотонного излучения в интервале энергий фотонов от 0,005 МэВ до 3 МэВ.

Дозиметр обеспечивает измерение мощности дозы в двух режимах работы: «ПОИСК» и «ИЗМЕРЕНИЕ»

Дозиметр в режиме работы «ИЗМЕРЕНИЕ» обеспечивает измерение мощности эквивалентной дозы окружающей среды в диапазоне от 0,10 мкЗв/час до 99,99 мкЗв/ч или мощности экспозиционной дозы в диапазоне от 0,010 до 9,999 мР/ч.

В режиме работы «ПОИСК» дозиметр обеспечивает измерение мощности эквивалентной дозы окружающей среды в диапазоне от 1,0 до 999,9 мкЗв/ч или мощности экспозиционной дозы от 0,10 до 99,99 мР/ч.

Предел допускаемой основной погрешности измерения (для 95 % доверительного интервала) в любой точке диапазона, при градуировке по источнику ^{137}Cs и нормальных условиях применения, составляет: в режиме работы «ИЗМЕРЕНИЕ»:

$$\pm(15 + \frac{5H}{\dot{H}})\%, \pm\left(15 + \frac{0,5H}{\dot{X}}\right)\%;$$

в режиме работы «ПОИСК»: $\pm(30 + \frac{10H}{\dot{H}})\%, \pm\left(30 + \frac{0,1H}{\dot{X}}\right)\%$,

где \dot{H} – измеряемое значение мощности эквивалентной дозы в мкЗв/ч; \dot{X} – измеряемое значение экспозиционной дозы в мР/ч; H – размерность диапазона (1 мкЗв/ч); X – размерность диапазона (1 мР/ч).

Время измерения в режиме работы «ИЗМЕРЕНИЕ» не превышает 45 с, в режиме работы «ПОИСК» – 4,5 с.

Дополнительная погрешность от изменения температуры в рабочих условиях составляет 3 % от показаний дозиметра в нормальных условиях.

Изменение чувствительности дозиметра, в зависимости от энергии регистрируемого излучения в диапазоне 0,05...3 МэВ при нормальном положении, не отличается более чем на 25 % от чувствительности от образцового источника ионизирующего излучения цезий-137.

7.2.4. Устройство и принцип работы

Электрическая схема дозиметра представлена на рис. 7.2.1.

Регистрация уровней мощности эквивалентной дозы и экспозиционной дозы осуществляется двумя отдельными группами газоразрядных счетчиков с различными корректирующими фильтрами. Каждая группа включает два газоразрядных счетчика СБМ-20.

В газоразрядных счетчиках СБМ-20 под воздействием гамма-квантов генерируются электрические импульсы тока, поступающие на формирователь входного потока импульсов, входной каскад которого преобразует импульсы тока в импульсы напряжения с амплитудой, необходимой для регистрации пересчетной схемой. С выхода делителя частоты формирователя импульсного потока импульсы поступают на четырехразрядный счетчик. Накопленная информация за время измерения на счетчике поступает через дешифратор, преобразующий двоично-десятичную информацию счетчика в семисегментный позиционный код индикатора.

Время измерения определяется частотой регулируемого генератора и коэффициентом деления числа импульсов формирователем временного интервала. Изменением времени измерения производится масштабирование (преобразование) входной информации с детекторов в абсолютную величину выходного параметра (мкЗв/ч, мР/ч).

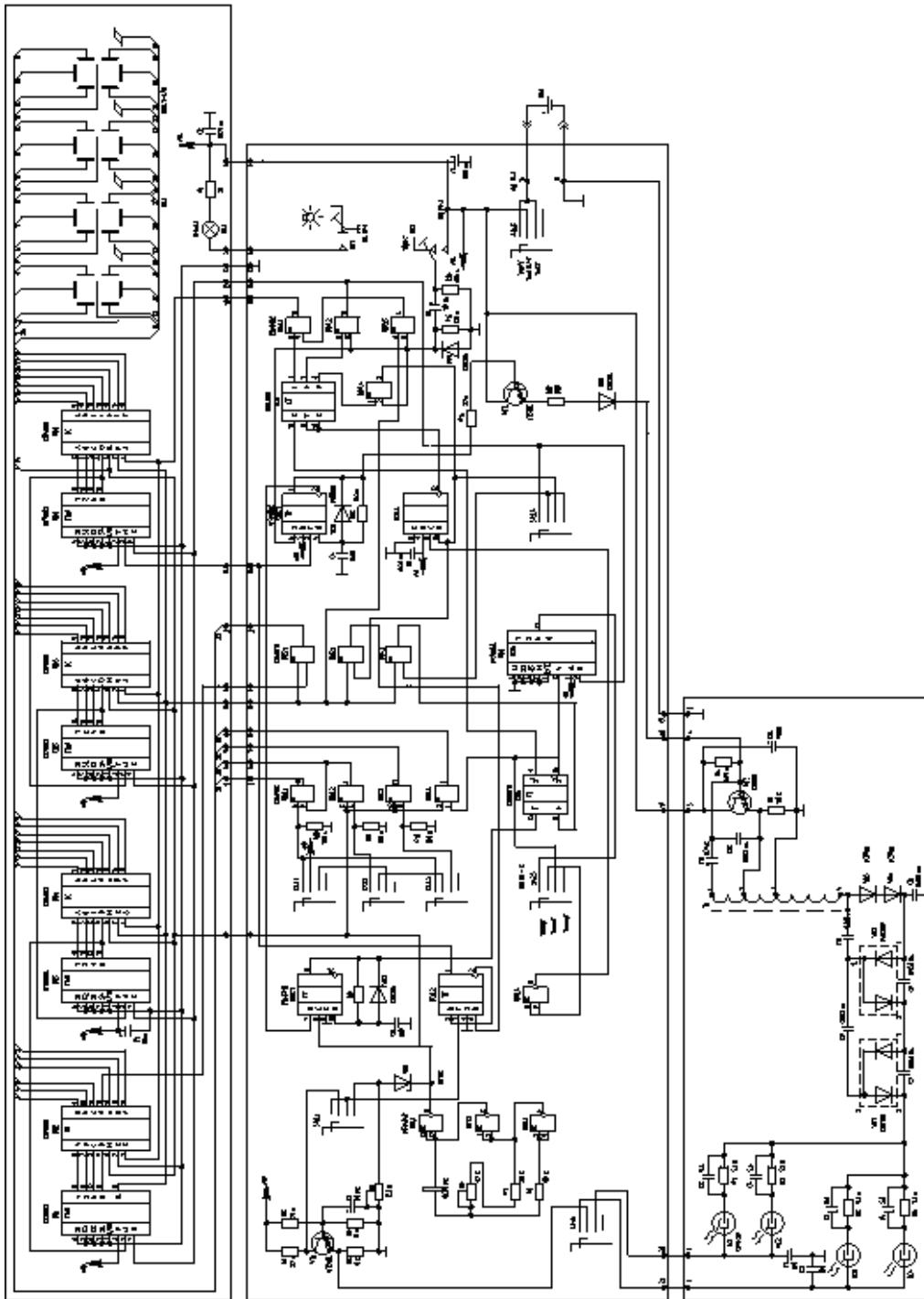


Рис. 7.2.1. Схема электрическая принципиальная дозиметра ДБГ-06Т

Одновибратор импульсов выполняет двойную функцию: осуществляет, совместно со стробирующим устройством, коррекцию нелинейности счетной характеристики, вызванной просчетами («мертвым временем») детекторов и осуществляет управление мощностью высоковольтного преобразователя напряжения для питания детекторов в зависимости их от загрузки.

Устройство команд вырабатывает импульсы управления основными узлами дозиметра в различных режимах работы.

7.2.5. Принцип работы дозиметра

Принцип работы дозиметра заключается в следующем: фотонное излучение, воздействуя на газоразрядные счетчики, вызывает появление в них электрических импульсов тока, которые поступают на входной каскад, выполненный на транзисторе А2-ВТ-1 по схеме с общей базой. Входной каскад преобразует импульсы тока в импульсы напряжения, которые поступают с коллектора А2-ВТ1 (это означает транзистор ВТ-1 устройства А2) через контакты режимов работы («ИЗМЕРЕНИЕ»-«ПОИСК») на вход С делителя частоты А2-ДД2.2. С выхода делителя входная частота с детекторов, пересчитанная с коэффициентом 2, поступает в устройство индикации А1 для дальнейшей обработки. Устройство индикации А1 состоит из четырех двоично – десятичных счетчиков на микросхемах А1-ДД1, А1-ДД2, А1-ДД3, А1-ДД5, А1-ДД7, накопление информации в которых осуществляется за интервал времени измерения. Для преобразования двоично-десятичного кода счетчиков в семи-сегментный код жидкокристаллического индикатора НЛ1-(ИЖЦ5-4/8) применяются дешифраторы А1-ДД2, А1 ДД4, А1-ДД-6, А1-ДД8, имеющие внутренние регистры, позволяющие хранить входную информацию за предыдущий цикл измерения.

Время измерения регулируется изменением частоты генератора, выполненного на микросхеме А2-ДД1.

Регулировка частоты осуществляется резистором-Р6.

С целью корректировки нелинейности счетной характеристики дозиметра, вызванной просчетами (мертвым временем) детекторов, импульсы с генератора импульсов поступают на схему формирователя временного интервала А2-ДД4 через стробирующее устройство – одновибратор на микросхеме А2-ДД2.1. Устройство срабатывает по переднему фронту импульса генератора на входе С при наличии высокого уровня напряжения на входе Д. При низком уровне сигнала на входе Д, что соответствует моменту срабатывания одновибратора на микросхеме А2-ДД7.1, запускаемого импульсами с делителя входной частоты на микросхеме А2-ДД2.1, часть импульсов генератора будет просчитана, что в конечном счете увеличивает время измерения. Длительность импульса одновибратора на микросхеме А2-ДД7.1 равна 0,2 мс, что соответствует значению разрешающего времени детекторов.

Импульсы с одновибратора А2-ДД2.1 поступают на двоичный счетчик-делитель на микросхеме А2-ДД4 с коэффициентом деления 2^{10} для формирования интервала времени измерения порядка 4,0 с. В ре-

жиме «ИЗМЕРЕНИЕ» вводится дополнительный делитель с коэффициентом пересчета 10 на микросхеме А2-ДД6 для создания интервала времени порядка 40 с.

По окончании интервала измерения по заднему фронту импульса временного интервала триггера А2-ДД7.2 разрешается запуск счетчика делителя А2-ДД8, вырабатывающего ряд команд управления, последовательно появляющихся на каждом выходе микросхемы А2-ДД9, с периодом следования, определяемым частотой импульсов на входе С с микросхемы А2-ДД8, и поступающих на вход микросхемы А2-ДД9. Через микросхему А2-ДД5.2 организуется команда «БЛОКИРОВКА» счета входного делителя А2-ДД2.2. На выводе 1 микросхемы А2-ДД8 – команда «ПЕРЕЗАПИСЬ» содержимого счетчиков в регистры дешифраторов, на выводе 7 – «СБРОС СЧЕТЧИКОВ» устройств А1 и А2, на выводе 4 команда – «СБРОС УПРАВЛЕНИЯ». По окончании последней команды схема автоматически переходит на новый цикл измерения.

В режиме «ИЗМЕРЕНИЕ» высокий уровень напряжения команды «СБРОС СЧЕТЧИКОВ» (микросхема А2-ДД9.2) блокирует счетчики устройства индикации А1 и через микросхему А2-ДД5.3 счетчик временного интервала (А2-ДД4). Команда «СБРОС УПРАВЛЕНИЯ» не вырабатывается из-за отсутствия частоты с вывода 9 микросхемы А2-ДД4.

Повторный запуск в режиме «ИЗМЕРЕНИЕ» возможен только при нажатии кнопки СБРОС, при этом положительный импульс с дифференцирующей цепочки А2-С6, А2-R15 сбрасывает триггер управления (А2-ДД7.2) и с появлением низкого уровня напряжения на входах R микросхем А2-ДД2.2 и А2-ДД4 осуществляется запуск всех схем на новый цикл измерения.

Для нормального функционирования жидкокристаллического индикатора на общий электрод индикатора (выводы 1,34) поступают импульсы напряжения (частотой порядка 300 Гц) с выхода генератора импульсов. При отображении сегментов (высвечивании) индикатора импульсы напряжения управляющей частоты подаются в противофазе относительно общего электрода, что осуществляется в дешифраторах.

Управление запятыми индикатора в различных режимах работы и измерения построено на микросхеме А2-ДД-3.

Коммутация запятых в различных режимах работы осуществляется переключателями SA2.2 и SA1.1, SA1.2. Индикация времени измерения отображается миганием запятой первого разряда с периодом 4с.

При переполнении счетчика А1-ДД1 на выводе 10 возникает высокий уровень напряжения, что вызывает гашение информации в младших 3-х разрядах индикатора (вход «К» дешифраторов). В старшем разряде гасится только сегмент (вывод 32), благодаря чему на табло индикатора

высвечивается символ «П». Сигнал гашения сегмента снимается с выхода микросхемы А2-ДД5.1

Сигнал переполнения с выхода микросхемы А2-ДД5.2 блокирует счет входного делителя А2-ДД2.2 и делитель А2-ДД4 с выхода микросхемы А2-ДД5.3. Запуск дозиметра возможен только после нажатия кнопки «СБРОС».

В режиме работы «КОНТРОЛЬ» на вход делителя А2-ДД2.1 поступают импульсы с генератора опорных частот с цепочкой А2-VD1; регулировкой амплитуды импульса посредством резистора А2-R5 добиваются прекращения срабатывания микросхемы А2-ДД2.2 при минимальном напряжении источника питания 6,5 В. При нормальной работе входного делителя А2-ДД2.2, делителя А2-ДД4 и четырехразрядного счетчика, в режиме «КОНТРОЛЬ» на шкале индикатора всегда отображается число 0515.

Преобразователь высокого напряжения для питания газоразрядных счетчиков выполнен по схеме однотактного генератора с обратной связью на транзисторе А3-VT1. При работе на холостом ходу (фоновые уровни излучения) собственная частота колебаний (3 Гц) определяется цепью А3-R6, А3-С12, а длительность импульса 40 мкс – трансформатором А3 Т1.

В первом звене схемы умножения включены высоковольтные стабилитроны А3-VD3, А3-VD4, фиксирующие амплитуды импульса с высоковольтной обмотки трансформатора на уровне 180 В.

При воздействии ионизирующего излучения входные импульсы с выхода делителя А2-ДД2.2 поступают на вход одновибратора длительностью 0,2 мс, открывают транзистор А2-VT2 и проводят блокинг-генератор в форсированный режим работы. При этом уменьшается период повторения импульсов блокинг-генератора за счет шунтирования резистора А3-R6, цепью А2-R17, А2-VD5 и возрастает мощность преобразователя. Таким образом осуществляется экономичный режим работы преобразователя напряжения при фоновых загрузках.

7.2.6. Подготовка к работе

Включить дозиметр, для чего установить переключатель диапазона в одно из положений: мР/ч или мкЗв/ч, а переключатель режимов работы в положение КОНТР.

Осуществить сброс показаний нажатием кнопки СБРОС.

На цифровом табло должно отображаться число 0515 (без учета запятых при нажатии кнопки 0).

7.2.7. Порядок работы

Установить переключатель режимов работы в положение ПОИСК, переключатель поддиапазонов измерения в положение мР/ч или мкЗв/ч.

Произвести сброс показаний нажатием кнопки СБРОС.

Определить направление излучения по максимальным показаниям на цифровом табло, ориентируя дозиметр в пространстве. Отсчет показаний производится непосредственно в единицах установленного поддиапазона измерения. В режиме работы ПОИСК смена информации на цифровом табло осуществляется автоматически в такт с миганием запятой в младшем разряде.

Для повышения точности измерения при уровнях мощности дозы в пределах до 99,99 мкЗв/ч или 9,999 мР/ч определение действительного значения целесообразно производить в положении ИЗМЕРЕНИЕ переключателя режима работы. В режиме работы ИЗМЕРЕНИЕ на цифровом табло отображаются нули во всех разрядах, и мигает запятая в младшем разряде. Отсчет показаний производится в конце цикла измерения в момент прекращения мигания запятой младшего разряда. Показания на цифровом табло сохраняются до момента нажатия кнопки СБРОС и запуска дозиметра на новый цикл измерения.

При уровнях мощности дозы, превышающих предельные значения, на цифровом табло отображается переполнение – высвечивается символ «П» и отсутствует мигание запятой младшего разряда.

При отображении переполнения в режиме работы «ИЗМЕРЕНИЕ» переключатель режимов работы перевести в положение ПОИСК.

7.2.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое изложение материала с описанием назначения прибора, основных технических характеристик, области применения.
3. Описание принципа работы прибора с использованием структурной и принципиальной схем, привести структурную схему дозиметра (основные положения инструкции по эксплуатации дозиметра).
4. Дать определения экспозиционной, эквивалентной и поглощенной дозы и их соотношения между ними.
5. Привести результаты дозиметрических измерений в единицах экспозиционной и эквивалентной дозы (провести измерения фона и вблизи источников гамма-излучения).
6. Оценить погрешность измерений.

7.2.9. Контрольные вопросы

1. Дать определения поглощенной и эквивалентной дозы гамма-излучения и их единиц измерения.
2. Объяснить работу блок-схемы и принципиальной схем дозиметра.
3. Объяснить, почему погрешность измерения данного дозиметра, имеющего две группы счетчиков, меньше, чем у дозиметров, имеющих одну группу счетчиков?

Список использованных источников

1. Техническое описание по эксплуатации дозиметра ДБГ-ОбТ.
2. Юдин М Ф. Дозиметрия фотонного излучения. – М: Изд-во Госстандарта, 1970. – 280 с.
3. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1981. – 392 с.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99. СП 2.6.1.758-99. – М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с.

7.3. Изучение клинического дозиметра 27012 и его калибровка

7.3.1. Цель работы

Целью настоящей работы является изучение дозиметра, его технических характеристик, порядка настройки, калибровки и проведения измерений.

7.3.2. Общие сведения

1. Назначение

Клинический дозиметр 27012 является образцовым дозиметрическим прибором, который рекомендуется для клинического применения в лучевой терапии и диагностике. Вследствие большого диапазона измерения он пригоден, при применении соответствующих камер, для дозиметрических измерений в различных областях науки и техники.

2. Технические характеристики

Тип камеры	Диапазон дозы	Диапазон мощности дозы
VA-K –251	30, 100, 300 P	10; 33;3; 100 P/мин
VA-K 252,1	1000; 3000 P	333; 1000 P/мин
VA-R 252,2	1000 P	3300 P/мин
VA-K 253	1; 3; 10; 30;100;300 P	0,33; 1;3; 33; 10; 33,3; 100 P/мин
VA-K 254	1,5;5;15;50;150;500 мP	30; 100; 300; 1000; 3000; P/мин

3. Пределы погрешности измерений

Основная погрешность после проведенной калибровки камерой VA-K 253: при применении камер VA-K –251; VA-K 252,1; VA-K-252; 27012: $\pm 7\%$, при применении камеры VA-K –254: $\pm 8\%$.

Дополнительная погрешность при изменении температуры окружающей среды: $3,5\%$.

Напряжение ионизационной камеры – 250 В.

Готовность к эксплуатации – 15 мин.

Контрольный излучатель 5109.11.

Тип источника – QВ.

Изотоп – ^{90}Sr – ^{90}Y .

Активность – 5 мКюри.

Мощность дозы в большом рабочем отверстии: 6,8...8,6 Р/мин.

Мощность дозы на оболочке контрольного излучателя в направлении лучей источника – 1 мР/час.

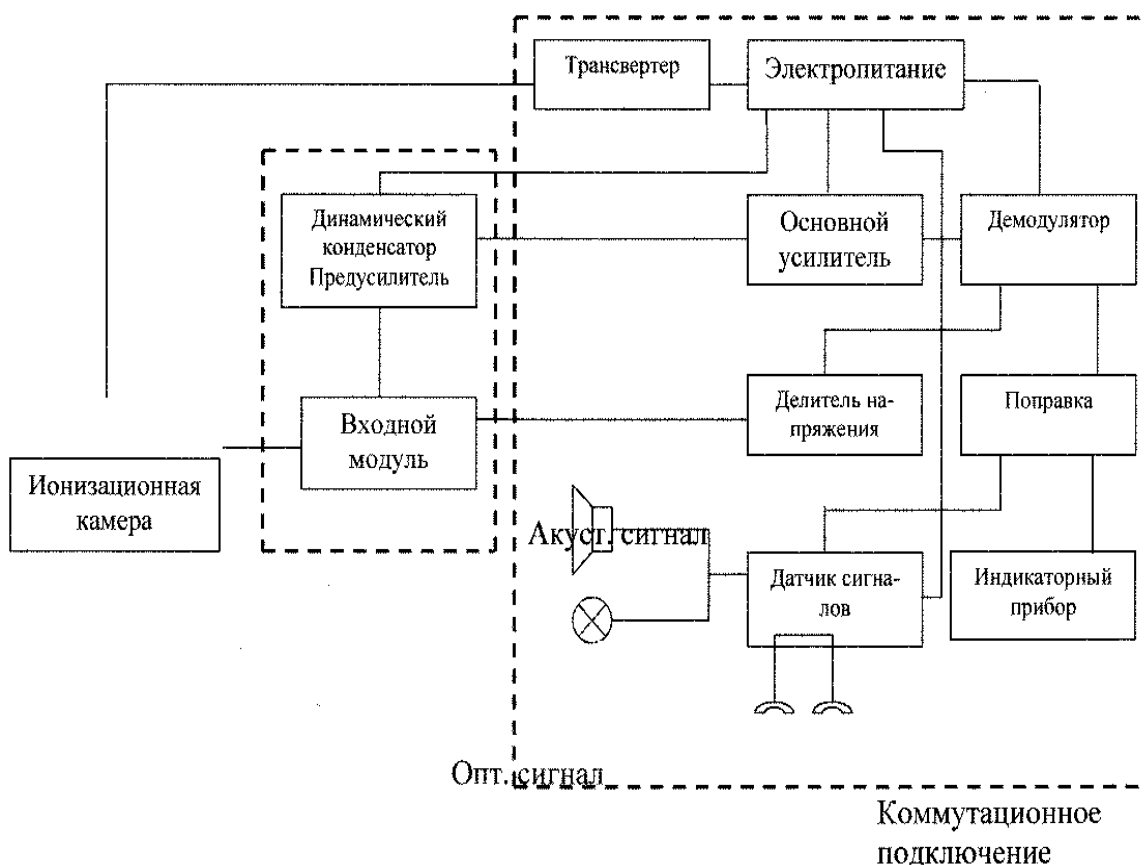


Рис. 7.3.1. Схема клинического дозиметра 27012

7.3.3. Принцип работы прибора

Вследствие ионизации в активном объеме ионизационной камеры возникают носители зарядов. Они создают входной сигнал для электронной части дозиметра. Оценка входного сигнала осуществляется измерением зарядов или токов во входном модуле, который имеет измерительный конденсатор и измерительное сопротивление. Сигнал поступает через измерительный конденсатор (измерение дозы) или через измерительное сопротивление (измерение мощности дозы) на вход дозиметра. Из-за малых ионизационных токов осуществляется электронное преобразование и происходит усиление по мощности входного сигнала с помощью применения схемы с динамическим конденсатором. Отличительными признаками такой схемы являются высокая чувствительность, большой диапазон измерения, малый дрейф нуля. В этой схеме происходит преобразование постоянного напряжения в пропорциональное переменное напряжение. В селективном усилителе с малым шумом это переменное напряжение усиливается и далее демодулируется в фазочувствительном выпрямителе.

Имеется датчик сигналов, который срабатывает при превышении порогового значения и вырабатывает оптический и акустический сигнал. Одновременно имеющийся контакт может отключить установку излучения. Необходимое для работы ионизационной камеры постоянное напряжение создается в трансвертере.

Для калибровки видов измерения «ДОЗА» и «МОЩНОСТЬ ДОЗЫ», для проверки работы дозиметра имеется контрольный излучатель с источником излучения $Sr - {}^{90}Sr - {}^{90}Y$. Для этого сферическая камера вводится в контрольный излучатель и там фиксируется.

7.3.4. Эксплуатация прибора

1. Установка нулевой точки

Для этого выключатель «ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕРЕНИЯ» включить в самое чувствительное положение, отверткой на регуляторе «НУЛЕВАЯ ТОЧКА ПЛАВНО» установить на нулевую точку. Если диапазон регулирования недостаточен, используют регулятор «НУЛЕВАЯ ТОЧКА ГРУБО», находящийся на задней стенке прибора.

2. Калибровка

2.1. Сферическая камера вводится в рабочее отверстие контрольного излучателя. Указанная на стержне камеры красная метка должна совпадать с меткой контрольного излучателя.

2.2. Калибровка перед измерением мощности дозы: Сферическая камера VA-K –253 типа 70 110 вставляется в контрольный излучатель; Диапазон измерения: 10 Р/мин, вид измерения «МОЩНОСТЬ ДОЗЫ».

С помощью регулятора «ПОПРАВКА» устанавливается показание на измерительном приборе на значение согласования. Значение согласования определяется следующим образом: в протоколе испытания, находящемся в инструкции по технической эксплуатации дозиметра, указаны контрольное отклонение стрелки и дата выдачи. Это контрольное отклонение умножается на коэффициент «п», который указан в табл. 7.3.1. Этим самым учитывается снижение активности излучения контрольного источника с момента выдачи, который принимается за момент времени 0, регулятор «ПОПРАВКА» остается в этом положении для всех других измерений мощности дозы, пока не потребуется новое согласование.

Таблица 7.3.1

Зависимость контрольного отклонения стрелки от снижения активности излучения контрольного источника

Время (в годах)	Коэффициент п	Время (в годах)	Коэффициент п
0	1,000	5,00	0,884
0,25	0,994	5,25	0,878
0,50	0,998	5,5	0,873
0,75	0,982	5,75	0,867
1,00	0,975	6,00	0,867
1,25	0,970	6,25	0,857
1,5	0,964	6,50	0,851
1,75	0,958	6,75	0,846
2,00	0,952	7,00	0,841
2,25	0,946	7,25	0,836
2,50	0,940	7,50	0,831
2,75	0,934	7,75	0,825
3,00	0,929	8,00	0,820
3,25	0,923	8,25	0,815
3,50	0,917	8,50	0,810
3,75	0,911	8,75	0,805
4,00	0,906	9,25	0,801
4,25	0,900	9,25	0,795
4,50	0,895	9,50	0,790
4,75	0,889	9,75	0,786

2.3. Калибровка перед измерением дозы: сферическая камера VA-K -253 типа 70110 вставляется в контрольный излучатель.

Установки на приборе: диапазон измерения 30 Р, для камеры типа 70110 (10 Р/мин) вид измерения: при переключении с положения «0» в

положение «ДОЗА» ОДНОВРЕМЕННО ВКЛЮЧИТЬ СЕКУНДОМЕР И НАЧАТЬ ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ и по истечении 3 мин 01 с вынуть сферическую камеру из контрольного источника и закрыть рабочее отверстие излучателя заглушкой. Значение дозы определяют умножением значения мощности дозы на время измерения с учетом значения согласования. Значение регулятора «ПОПРАВКА» ОСТАЕТСЯ НЕИЗМЕННЫМ до нового согласования.

7.3.5. Проведение измерений

Установка диапазона измерений: для уменьшения погрешности показаний диапазон измерения устанавливают таким образом, чтобы значение показания находилось в верхних двух третях шкалы. При использовании различных типов ионизационных камер и различных диапазонов измерений, для правильного отсчета измерений использовать «Инструкцию по технической эксплуатации клинического дозиметра 27012».

7.3.6. Содержание отчета

1. Краткое изложение принципа работы дозиметра; его основных технических характеристик; области применения. Привести блок-схему прибора.
2. Провести калибровку дозиметра и привести результаты измерений.
3. Провести измерения дозы рентгеновского излучения рентгеновского аппарата «Мира-2Д» на расстоянии 0,5; 1,0 м за 100 с.

7.3.7. Контрольные вопросы

1. Дать понятие калибровки.
2. Дать определения экспозиционной и поглощенной дозы.
3. Объяснить принцип работы ионизационной камеры.
4. Объяснить принцип работы схемы измерения дозы и измерения мощности дозы.

Список использованных источников

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1987. – 392 с.
2. Юдин М.Ф. Дозиметрия фотонного излучения. – М.: Изд-во Госстандарта, 1970. – 280 с.
3. Техническая инструкция по эксплуатации клинического дозиметра 27012.

7.4. Техника безопасности и защита от ионизирующих излучений с помощью лабиринтов

7.4.1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями защиты от фотонного излучения с помощью лабиринтов, провести измерения дозных полей в лабиринтной защите от тормозного излучения электронного ускорителя, на основании полученных данных выполнить расчет толщины защитной двери на входе в лабиринт.

7.4.2. Прохождение излучения через неоднородности в защите

В защите ядерно-технических установок очень часто имеются различного типа неоднородности. Под неоднородностью защиты также следует понимать различные каналы обслуживания. Чем сложнее защищается установка, тем сложнее система этих каналов: дверные проемы, проемы и каналы для наблюдений, проходы в помещения повышенного уровня облучения (лабиринты), отверстия для электропроводки, вентиляции и т. д. Наличие неоднородности в защите создает возможность «прострела» излучения в этой области, т. е. ухудшаются (ослабляются) защитные свойства защиты в этой области.

Ослабление защиты неоднородностями обычно характеризуют величиной, называемой вероятностью увеличения поля излучения ε :

$$\varepsilon = \frac{\text{характеристика поля излучения при наличии неоднородностей}}{\text{характеристика поля излучения без неоднородностей}}.$$

Чтобы определить, какие дополнительные защитные меры необходимо применить при наличии каналов, необходимо уметь рассчитывать поле излучения в области неоднородности. Необходимо также уметь рассчитывать распространение излучения в каналах, т. к. один из методов защиты – это специальная форма канала (лабиринт).

При решении практических задач такого рода удобно разлагать полную величину, характеризующую поле излучения, на компоненты.

Рассмотрим два типа каналов и основные компоненты поля излучения.

1. Прямой канал

Определяем излучение в точке Р. Φ – полная плотность потока в точке Р:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4, \quad (1)$$

где $\Phi_1 = \Phi_{пр}$ – составляющая плотности потока, обусловленная нерассеянным излучением прямой видимости; $\Phi_2 = \Phi_{ал. пр.}$ – альбедное излучение прямой видимости; $\Phi_3 = \Phi_{нат}$ – составляющая, обусловленная излучени-

ем натекания, которое прошло через окружающую защиту, вошло в канал через его боковую стенку и попало в точку детектирования без рассеяния от стенок канала; $\Phi_4 = \Phi_{ал. нат}$ – альбедное излучение натекания, которое вошло в канал через его стенку и попало в точку детектирования после рассеяния от видимых из точки детектирования стенок канала.

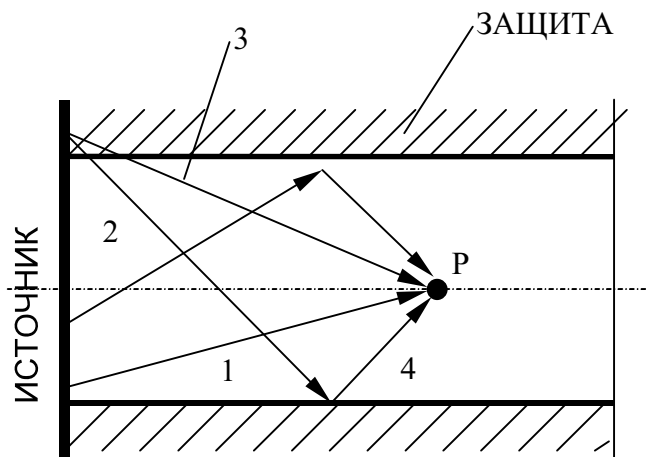


Рис. 7.4.1. Прямые каналы

Выражение (1) можно записать как:

$$\Phi = \Phi_{пр} + \Phi_{ал. пр} + \Phi_{нат} + \Phi_{ал. нат}. \quad (2)$$

При расчете Φ надо уметь рассчитывать все 4 компоненты. $\Phi_{пр}$ дает наибольший вклад в Φ .

Нерассеявшееся излучение прямой видимости непосредственно не попадает в точку детектирования.

2. Изогнутый канал

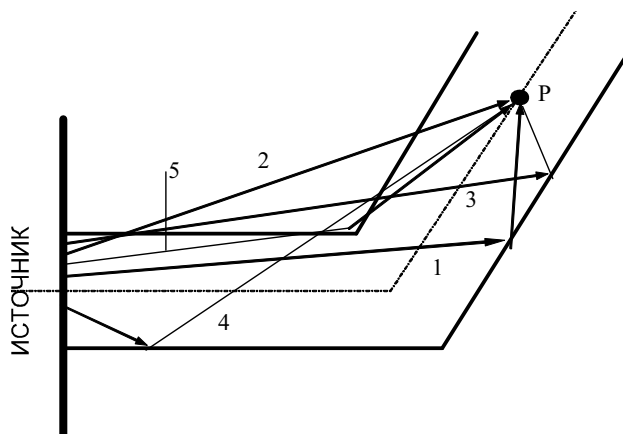


Рис. 7.4.2. Изогнутый канал:

1 – $\Phi_{ал. пр}$; 2 – $\Phi_{нат}$; 3 – $\Phi_{ал. нат}$; 4 – $\Phi_{нат. ал}$ – составляющая излучения, обратного рассеянного от части стенок канала, невидимой из точки детектирования, и попавшего в точку детектирования P после прохождения через защиту; 5 – $\Phi_{угл}$ – составляющая излучения для изогнутых каналов, попадающего в точку детектирования после рассеяния на угле

С учетом этих обозначений имеем:

$$\Phi = \Phi_{ал. пр} + \Phi_{нат} + \Phi_{ал. нат} + \Phi_{нат. ал} + \Phi_{угл}. \quad (3)$$

Мы рассмотрели разложение на компоненты плотности потока; аналогичное разложение полной характеристики поля излучения на отдельные компоненты применимо и к интенсивности дозы, мощности дозы и т. д.

Из приведенных двух примеров видно, что задача определения поля излучения в канале достаточно сложна. Имеются три подхода к определению характеристик поля излучения в защите с неоднородностями.

1-й подход. Он заключается в использовании методов, основанных на некоторых макроскопических константах, характеризующих закономерности распространения излучения в средах. При этом отдельно рассчитывают каждую компоненту поля излучения. Вклад каждой компоненты в общее поле излучения определяется условиями задачи.

Основная трудность – расчет рассеянного излучения. Для расчетов применяют несколько методов. Если расчеты громоздкие, то применяют ЭВМ.

2-й подход – использование метода Монте-Карло. При этом получают наиболее точные результаты, геометрия может быть любой сложности. Но надо иметь соответствующую программу для расчетов.

3-й подход – это применение различных эмпирических формул – инженерный метод.

Второй подход является более универсальным. Первый и третий используются обычно для более простых неоднородностей, дают менее точный, но более быстрый ответ.

Отметим в заключение этого раздела, что, конечно, самый надежный метод – это экспериментальное определение поля излучения в канале. Но это можно сделать только после сооружения соответствующей защиты, а результаты необходимы уже на стадии ее проектирования. После сооружения защиты экспериментальное определение поля излучения необходимо для проверки надежности ее защитных свойств. Это позволяет скорректировать возможные ошибки и неточности на этапах проектирования и сооружения защиты.

7.4.3. Расчет лабиринтной защиты

Лабиринт можно рассматривать как одну из разновидностей каналов в защите. Цель создания лабиринта – обеспечить доступ в помещение с источником и при этом уменьшить поле излучения на входе в лабиринт, полностью исключив прямое излучение. Часто на входе в лабиринт мощность дозы уменьшается до предельного значения, и далее нет необходимости ставить защитную дверь.

Расчет лабиринтной защиты сводится к определению уровня излучения на входе в него.

В общем виде мощность дозы в любой точке лабиринта определяется как сумма мощностей доз, создаваемых прямым и отраженным излучением. Например, для мощности поглощенной дозы имеем

$$\dot{D} = \dot{D}_{\text{пр}} + \dot{D}_{\text{стр}} + \dot{D}_{\text{нат}}, \quad (4)$$

$\dot{D}_{\text{пр}}$ – как правило, равно 0, что должен обеспечить лабиринт; $\dot{D}_{\text{нат}}$ – выход от излучения, прошедшего через выступы лабиринта (легко вычисляется). Чаще всего вклад от этой компоненты столь мал, что им пренебрегают; $\dot{D}_{\text{стр}}$ – вклад от отраженного излучения (трудно вычислить). Как правило, именно эта компонента определяет дозы на выходе из лабиринта.

Займемся ее вычислением.

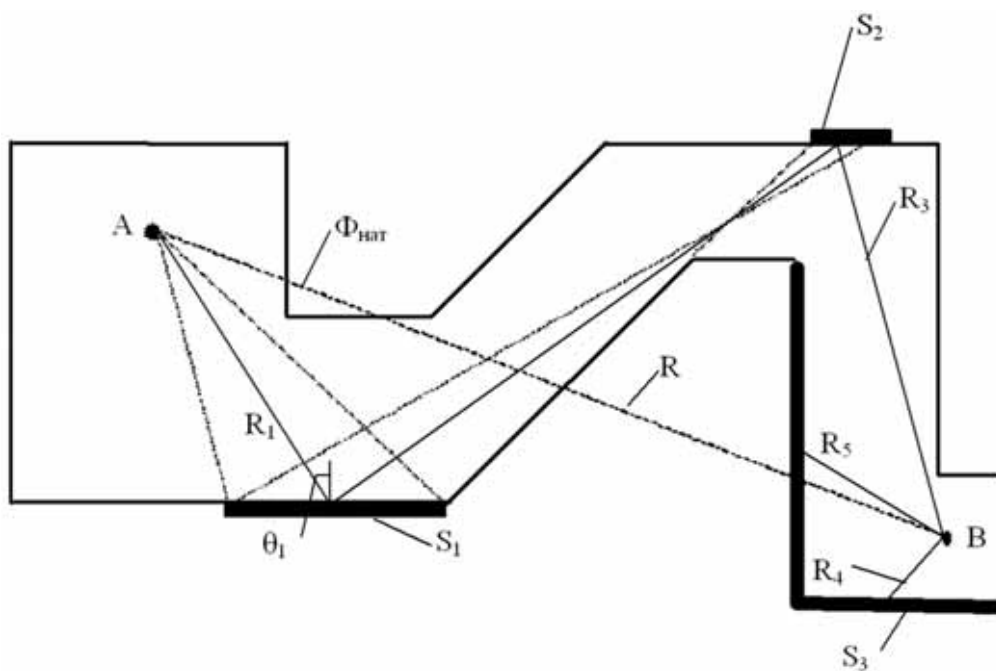


Рис. 7.4.3. Схема расчета дозы в лабиринте

Материал – бетон. Источник задан значением гамма-эквивалента M (...). Мощность поглощенной дозы связана с гамма-эквивалентом соотношением

$$\dot{D} = M \cdot 3,7 \cdot 10^7 \cdot 55,3 / R_2 \text{ (аГр/с)}. \quad (5)$$

Точка А – источник. Излучение из точки А приходит на S_2 :

- 1) от площади стены S_1 ;
- 2) площади пола S_1' ;
- 3) площади потолка S_1'' .

Мощность поглощенной дозы в любой точке площадки S_1 (D_1) равна:

$$\dot{D}_1 = \frac{M \cdot 3,7 \cdot 10^7 \cdot 55,3 \cdot 10^{18} \cdot 10^6 \cdot 3600}{R_1^2} = \frac{7,4 \cdot M}{R_1^2} \text{ [мкГр/ч]}. \quad (6)$$

Мощность дозы излучения, падающего на всю площадку S_1 (m^2), равна:

$$\dot{D}_{S_1} = D_1 \cdot S_1 \cdot \cos \theta_1 = \frac{7,4 \cdot M \cdot S_1 \cdot \cos \theta_1}{R_1^2}, \quad (7)$$

где θ_1 – угол между нормалью к S_1 и R_1 . Чем больше θ_1 , тем меньше величина площадки, перпендикулярной $\vec{\Omega}$ – направлению движения частиц. Доза определяется плотностью потока, и при одной и той же плотности потока с увеличением θ_1 доза будет уменьшаться.

Мы уже отметили, что излучение от источника падает на стену, пол и потолок и затем, отражаясь, попадает на S_2 . Надо учесть все площади S_{11}, S_{12}, S_{13} . Тогда получим:

$$\dot{D}_{S_1} = 7,4 \cdot M \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_{1i} \cos \theta_{1i}}{(R_{1i})^2} \text{ [мкГр/ч} \cdot \text{м}^2\text{]}, \quad (8)$$

где n – число площадок, на которые падает излучение источника.

Формула (8) определяет суммарную мощность дозы от прямого пучка, попадающего на площадку (площадки) S_1 .

Чтобы вычислить (8), нужно найти $R_{1i}, \cos \theta_{1i}, S_{1i}$. Эти величины или вычисляют в соответствии с исходными размерами и схемой лабиринта, или определяют с чертежа лабиринта, выполненного в соответствующем масштабе.

Если источник коллимированный, то первичное излучение падает только на одну площадку и в формуле (8) в сумме останется одно слагаемое.

Точность вычисления \dot{D}_{S_1} определяет точность всего расчета. Иногда точный расчет \dot{D}_{S_1} можно выполнить лишь с помощью метода Монте-Карло.

Теперь найдем долю излучения, отраженного от всех площадок S_{1i} и дошедшего (упавшего) на S_2 . Для этого надо знать дозовое альбедро. Его величина зависит от θ_1 и E_0 – энергии падающего излучения. Имеются данные для полного дозового альбедро $a_d(E_0, \theta)$ в телесный угол 2π (половина сферы). В любом направлении в единицу телесного угла альбедро равно $a_d(E_0, \theta)/2\pi$.

Изобразим сначала процесс распространения излучения на схеме.

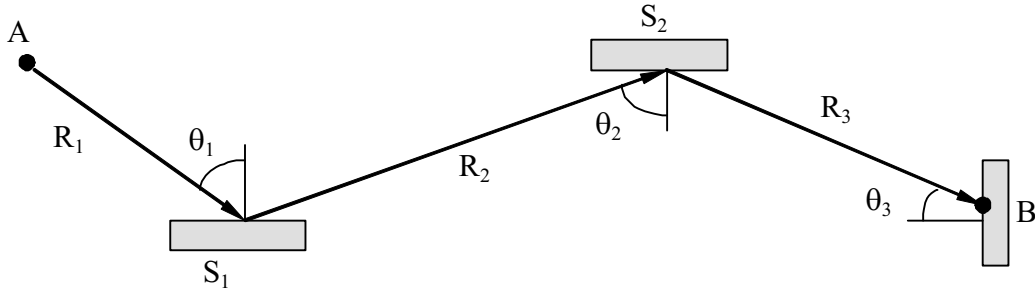


Рис. 7.4.4. Схема распространения излучения в лабиринте

Доля излучения (мощность дозы), отраженного от S_1 и упавшего на единицу площади S_2 , равна:

$$\delta_1 = \frac{a_{д1}(E_0, \theta_1)}{2\pi} \frac{1}{R_2^2} \cos \theta_2. \quad (9)$$

Доля излучения, отраженного от S_2 и дошедшего до точки В, равна:

$$\delta_2 = \frac{a_{д2}(\bar{E}, \theta_2)}{2\pi} \frac{1}{R_3^2} \cos \theta_3, \quad (10)$$

где \bar{E} – средняя энергия отраженных фотонов.

Собирая все вместе, получим:

$$\dot{D}_B = \dot{D}_{S1} \cdot \delta_1 S_1 \delta_2 \text{ [мкГр/ч]}. \quad (11)$$

Очевидно, что и площадка S_2 «сложная» (стена, пол, потолок) и в окончательном выражении для \dot{D}_B должно быть двойное суммирование. Это значительно усложняет расчеты. Поэтому учтем только излучение, распространяющееся следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{11} &\rightarrow S_{21} \rightarrow \dots \rightarrow B \\ S_{12} &\rightarrow S_{22} \rightarrow \dots \rightarrow B \quad \text{и т. д.} \end{aligned}$$

Тогда выражение (11) с учетом (8) запишется в виде:

$$\dot{D}_B = \frac{7,4 \cdot M}{(2\pi)^2} \sum_{i=1}^n \underbrace{\frac{S_{1i} \cos \theta_{1i}}{R_{1i}^2}}_{\rightarrow S_1} \cdot \underbrace{\frac{a_{д1}(E_0, \theta_{1i}) \cos \theta_{2i} S_{2i}}{R_{2i}^2}}_{S_{1i} \rightarrow S_{2i}} \cdot \underbrace{\frac{a_{д2}(\bar{E}, \theta_{2i}) \cos \theta_{3i}}{R_{3i}^2}}_{S_{2i} \rightarrow B} \text{ [мкГр/ч]}. \quad (12)$$

Индекс i указывает, что нужно собирать излучение со всех площадок (стены, пол, потолок). Индекс альbedo 1, 2 указывает на кратность отражения излучения. В общем случае для m отражений выражение (12) можно переписать в виде:

$$\dot{D}_B = \frac{7,4 \cdot M}{(2\pi)^m} \sum_{i=1}^n \frac{\cos \theta_{1i}}{R_{1i}^2} \prod_{h=1}^m \frac{S_{ki} \cos \theta_{k+1i} \cdot a_{дki}(E, \theta_{ki})}{R_{k+1i}^2} \text{ [мкГр/ч]}. \quad (13)$$

Здесь $E = E_0$ – при первом отражении; $E = \bar{E}$ – при всех последующих.

Если $k + 1 > m$, то соответствующий сомножитель под знаком произведения равен 1.

Для упрощения расчетов следует учитывать только кратчайшие пути для отраженного излучения и размеры основных отражающих площадок. Обычно в лабиринтах площади стен больше площадей пола и потолка. Если учесть только отраженное излучение от стен, то формула (13) упростится (от Σ останется только одно слагаемое):

$$\dot{D}_B = \frac{7,4 \cdot M \cos \theta_1}{(2\pi)^m} \frac{S_k \cos \theta_{k+1} \cdot a_{dk}(E, \theta_k)}{R_1^2 \prod_{j=1}^m R_{k+1}^2} \quad (14)$$

Для учета отраженного излучения от пола и потолка вводят коэффициент запаса, равный 2. Как показывает практика, в этом случае расчетные значения мощности дозы в лабиринте превышают экспериментальные во всех точках. Это несколько увеличивает толщину защиты.

Теперь посмотрим на рис. 7.4.3 нашего лабиринта. Можно увидеть, что мы не учли часть излучения: отражается от S_2 , падает на площадки S_3, S_3' и затем уже попадает в точку В.

Учтем только излучение от площадки S_3 (ее площадь больше S_3'), тогда формула (14) запишется в виде:

$$\dot{D}_B = \frac{7,4 \cdot M \cos \theta_1}{R_1^2} \left[\frac{1}{(2\pi)^2} \prod_{j=1}^2 () + \frac{1}{(2\pi)^3} \prod_{j=1}^3 () \right] \quad (15)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow B} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow B}$

Из формул (13–15) ясно, как учесть дополнительные рассеяния и дополнительные площадки.

При расчете лабиринтов от излучения радионуклидов и рентгеновских трубок с $U_{\max} > 100$ кВ средняя энергия отраженных фотонов равна примерно 1 МэВ. Для тормозного излучения электронных ускорителей после первого отражения $\bar{E} \approx 0,2$ МэВ, после второго и последующих $\bar{E} \approx 0,1$ МэВ

Приведенные выше формулы получены для гамма-излучения нуклидов. Но их можно использовать для рентгеновского и тормозного излучения. В этом случае для вычисления \dot{D}_1 необходимо использовать величину радиационного выхода (лучевую отдачу) рентгеновской трубки для тормозного излучения – для рентгеновского источника или величину мощности поглощенной дозы тормозного излучения.

Приведенные выше формулы справедливы при следующих допущениях:

1. Источник можно сделать точечным.
2. Линейные размеры площадок малы по сравнению с расстоянием R_i .
3. Угловое распределение отраженного излучения изотропно.

Таблица 7.4.1

Интегральное дозовое альbedo от бетона для $E = 0,1$ МэВ
в зависимости от $\cos\theta$

$\cos\theta$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$a_d(\theta,0,1)$	0,52	0,45	0,37	0,33	0,29	0,27	0,23	0,22	0,20	0,18	0,17

Прямоугольные лабиринты

Как правило, лабиринты с двумя поворотами по 90° , при прохождении которых излучение претерпевает двукратное отражение, обеспечивают в большинстве случаев снижение мощности дозы на входе в лабиринт до предельно допустимых значений.

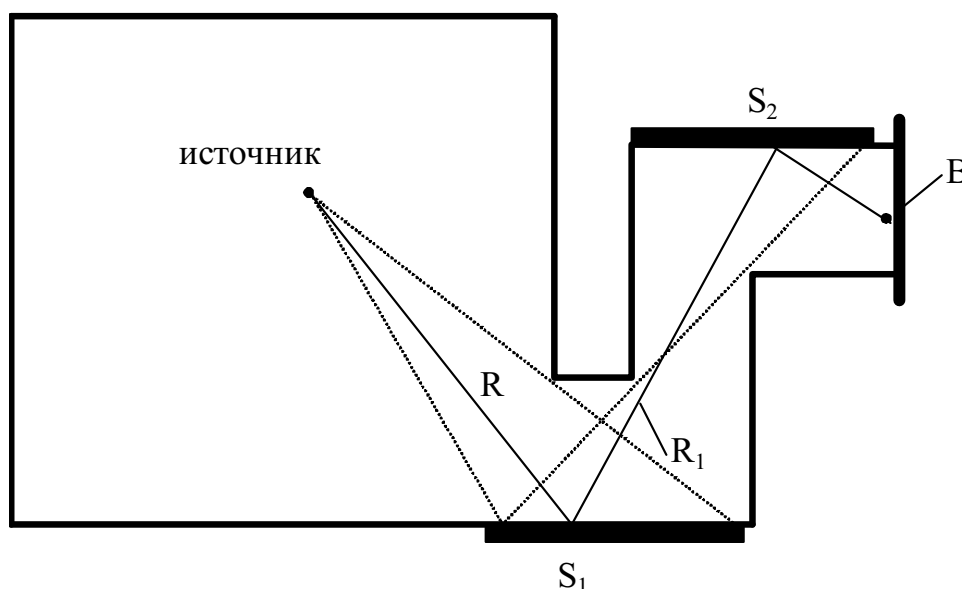


Рис. 7.4.5. Схема для расчета прямоугольного лабиринта

Для расчета мощности дозы на входе в лабиринт можно использовать описанную выше методику и формулы (13–15). Для расчета обычно используют следующую эмпирическую формулу

$$\dot{X}_B = \frac{\bar{m}_k A \Gamma_x}{R \prod_{i=1}^k R_i^2} \quad (\text{МР / ч}), \quad (16)$$

где k – число рассеяний (поворотов) в лабиринте; \bar{m}_k – эмпирические коэффициенты: $6 \cdot 10^2$ – для одного поворота; $2,8 \cdot 10^5$ – для двух поворотов; $R - R_1, R_2$ (см) – расстояния, указанные на рис. 7.4.5; A – активность источника (мКи); Γ_x – его гамма-постоянная ($\text{Р} \cdot \text{см}^2 / \text{ч} \cdot \text{мКи}$).

7.4.4. Описание установки и методика измерений

Работа проводится на установке с использованием в качестве источника излучения бетатрона МИБ-6М, расположенного на стационарной платформе (рис. 7.4.6). На пути распространяющегося пучка электронов установлена модель защиты с лабиринтом, имеющим прямоугольное сечение. Измерение проводится с помощью дозиметра VA-J-18 с ионизационной камерой VA-K-251.

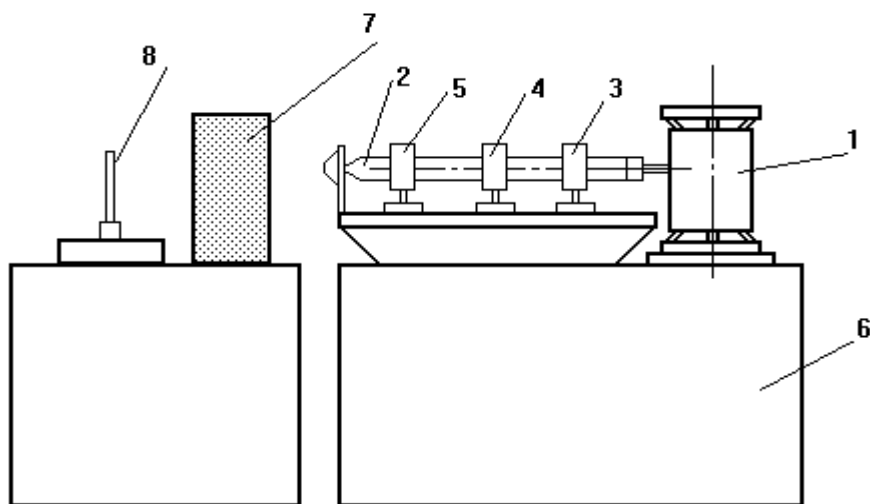


Рис. 7.4.6. Установка для исследования лабиринтных защит:
1 – бетатрон МИБ6-М; 2 – камера с электропроводом;
3–5 – квадрупольные линзы; 6 – платформа; 7 – разборный бетонный блок защиты; 8 – ионизационная камера VA-K-251

7.4.5. Работа с дозиметром

Перед включением нажать кнопку «НОЛЬ» выключателя «КОЭФФИЦИЕНТ F2».

Нажать выключатель «СЕТЬ». По истечении 2 мин дозиметр готов к проведению измерения. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «НОЛЬ» вход дозиметра замкнут накоротко, и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

Ионизационная камера закрепляется на штативе и фокусируется непосредственно на месте измерения.

Прутковая (наперстковая) камера является воздухоеквивалентной ионизационной камерой, предназначенной для измерения дозы и мощности дозы. Чувствительный ее объем равен 50 мм^3 . Материал электродов – воздухоеквивалентная смесь. Чувствительность при нормальных условиях – $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А} \cdot \text{мин/Р} \pm 3 \%$. Диапазон измерения мощности дозы 0 – 333, 1000, 3330, 10000, 33300 Р/мин. Конструктивно камера выполнена в виде прутка длиной 25 см, на который натянут пластмассовый шланг.

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облученной длины кабеля и может составлять при облученной длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем простого умножения трех коэффициентов и значения показывающей шкалы:

$$F_k \times F1 \times F2 \times F_{\text{шк}} = P \text{ [Р/мин]}.$$

F_k – коэффициент камеры, для прутковой (наперстковой) = 3,33.

$F1$ – переключатель 10.

$F2$ – кнопочный выключатель «КОЭФФИЦИЕНТ F2» 8.

$F_{\text{шк}}$ – показания стрелочного прибора.

Для прутковой камеры предельное значение диапазона измерения 3000 Р/мин или 3000 Р.

При измерении излучение проходит через защиту с лабиринтом. Электроны на выходе электропровода, попадая в лабиринт, претерпевают различные преобразования, создавая за защитой радиационное поле сложной конфигурации. Так как защита имеет существенную толщину, то радиационное поле является полем тормозного излучения, т. е. электроны испытывают полное торможение в защите.

7.4.6. Методика измерений

Для изучения механизмов прохождения излучения через лабиринт в защите блок защиты выполнен сборным с зигзагообразным лабиринтом (рис. 7.4.7). Измерения проводятся в трех точках лабиринта, указанных на рис. 7.4.7.

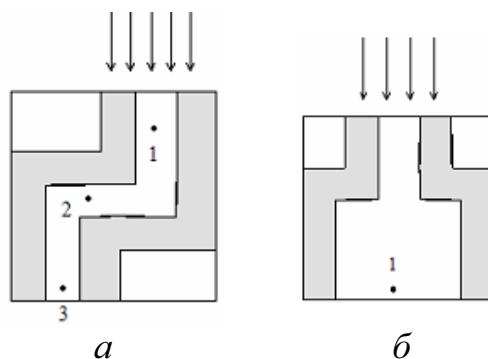


Рис. 7.4.7. Измерения в трех точках лабиринта

1. При измерении мощности дозы в первой точке изучается прохождение через ступенчатый канал. Для этого блоки устанавливаются так, как показано на рис. 7.4.7, б.

2. При измерении мощности дозы во второй точке изучается прохождение излучения через двухсекционный канал прямоугольного сечения, изогнутый под прямым углом. Сборка блоков осуществляется по рис. 7.4.7, а.

3. Измерение мощности дозы в третьей точке позволяет изучить прохождение излучения через многосекционные каналы и лабиринты в защите. При этом считают, что каждый предыдущий изгиб является «источником излучения» для последующего изгиба. Такой принцип используется при расчетах.

7.4.7. Порядок выполнения измерений

1. Для измерения мощности дозы при прохождении излучения через ступенчатый канал бетонные блоки собираются согласно рис. 7.4.7, б отверстием по центру потока электронов. Входное отверстие перекрыть ослабляющей пластиной с толщиной, рассчитанной так, что электроны с заданной энергией полностью тормозятся в ней.

2. Установить ионизационную камеру в точке измерения 1.

3. Включить блок питания бетатрона для прогрева в течение 5 мин.

4. Установить необходимый режим работы бетатрона: энергию, ток инжектора и настроить стабильность его работы.

5. Включить дозиметр с камерой VA-K-251.

6. Произвести измерение по дозиметрическому прибору VA-J-18 мощности дозы в данной точке.

7. Выключить излучение бетатрона.

8. Отключить питание магнита.

9. Защиту из бетонных блоков собрать согласно рис. 7.4.7, а.

10. Установить ионизационную камеру в точке измерения 2 по оси лабиринта.

11. Включить питание магнита бетатрона.

12. Включить через 3 минуты излучение бетатрона (ток инъекции).

13. Произвести измерение по дозиметрическому прибору VA-J-18 мощности дозы P_2 .

14. Выключить излучение бетатрона.

15. Выключить питание магнита.

16. Установить ионизационную камеру, не нарушая лабиринт, в зону точки измерения 3, располагая ее по центру сечения лабиринта.

17. Включить питание магнита бетатрона.

18. Включить через 3 минуты излучение бетатрона (ток инъекции).

19. Произвести измерение по дозиметрическому прибору VA-J-18 мощности дозы P_3 .

7.4.8. Обработка результатов

1. Произвести расчет защиты в проеме точки измерения лабиринта методом Гусева Н.Г.

2. Обосновать: необходима ли защита в указанной точке измерения.

7.4.9. Контрольные вопросы

1. Какой материал эффективен для защиты от электронного излучения и почему?
2. Какой материал эффективен для защиты от нейтронного излучения и почему?
3. Какой материал эффективен для защиты от гамма-излучения и почему?
4. Какие основные способы защиты от излучений применяются в промышленности?

Список использованных источников

1. Золотухин В.Г. Прохождение излучений через неоднородности в защите. – М.: Атомиздат, 1968.
2. Гусев Н.Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. – М.: Медгиз, 1956.
3. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. – М.: Атомиздат, 1966.

7.5. Техника безопасности и защита от ионизирующих излучений при работе на ускорителях электронов

7.5.1. Цель работы

Ознакомиться с организацией безопасных методов работы и защиты от ионизирующих излучений при работе на ускорителях электронов.

7.5.2. Факторы опасности при работе ускорителей

1. При работе ускорителя основными факторами радиационной опасности являются:
 - выведенные пучки ускоренных электронов;
 - тормозное излучение, возникающее при взаимодействии ускоренных электронов с окружающей средой;
 - фотонейтроны, возникающие при взаимодействии высокоэнергетического тормозного излучения с ядрами веществ окружающей среды;
 - другие виды излучений, возникающие при взаимодействии электронов и тормозного излучения с ядрами веществ окружающей среды;
 - нефиксированное радиоактивное загрязнение окружающей среды в рабочем помещении ускорителя, возникающее в результате активации пыли, металлов, стен, испарения активированных материалов мишени и узлов ускорителя под действием пучка электронов, проведения радиационных процессов и т. п.;

- радиоактивные газы и аэрозоли, образующиеся при облучении компонентов воздуха и веществ, поступающих в него из облучаемых объектов, а также из активируемой воды, охлаждающей узлы ускорителя;
- неиспользуемое рентгеновское излучение от высоковольтной электронной аппаратуры ускорителя.

2. Нерадиационные факторы опасности при работе ускорителя:

- озон и окислы азота, постоянно образующиеся в результате радиолиза под действием излучения ускорителей;
- электромагнитные поля высоких и сверхвысоких частот, создаваемые системами питания ускорителей;
- шум, создаваемый ускорителем при работе;
- токсичные вещества, выделяющиеся при облучении различных веществ;
- высокое напряжение;
- постоянные электрические и магнитные поля.

3. В зависимости от параметров пучка излучения и степени важности различных факторов опасности, ускорители подразделяются на две группы:

I группа – ускорители с максимальной энергией электронов 10 МэВ. При этих энергиях электронов фотоядерные реакции возможны лишь с небольшим количеством изотопов. В таких случаях наведенная активность окружающей среды практически не представляет опасности для здоровья людей. Сведения об образовании некоторых радиоизотопов с периодом полураспада $T_{1/2} > 5$ мин при работе ускорителя приведены в табл. 7.5.1.

Таблица 7.5.1

Сведения об образовании радиоизотопов с периодом полураспада $T_{1/2} > 5$ мин при работе ускорителя

№ п/п	Изотоп (содержание в естественной смеси, %)	Фотоактивация (пороговая энергия, МэВ)	Радиоизотоп (период полураспада)	Схема распада
1	$^{12}\text{Mg}^{25}$ (10,0)	p (12,06)	Na^{24} (15,0 ч)	β^- , γ
2	$^{20}\text{Ca}^{43}$ (0,145)	2p (19,91) p (10,67)	Ar^{41} (1,83 ч) K^{42} (12,4 ч)	β^- , γ β^- , γ
3	$^{20}\text{Ca}^{48}$ (0,18)	n (9,94)	Ca^{47} (4,53 дн)	β^- , γ Sc^{47} (3,4 дн.)
4	$^{24}\text{Cr}^{50}$ (4,35)	2n (23,32)	Cr^{48} (232 ч)	ϵ , γ
5	$^{28}\text{Ni}^{58}$ (67,77)	2n (22,45) T (21,16) n_1p (19,56) p (8,18)	Ni^{56} (6,1 дн) Co^{55} (18,2 ч) Co^{56} (77,3 дн) Co^{57} (270 дн)	ϵ , γ ϵ , β^+ , γ ϵ , β^+ , γ ϵ , γ

№ п/п	Изотоп (содержание в естественной смеси, %)	Фотоактивация (пороговая энергия, МэВ)	Радиоизотоп (период полураспада)	Схема распада
6	${}_{73}\text{Ta}^{181}$ (99,99)	$n_1\alpha$ (5,52) p (6,19) n (7,64) ηp (14,08) He^2 (13,34)	Lu^{176m} (3,7 ч) Hf^{180m} (5,5 ч) Ta^{180m} (8,1 ч) Lu^{179} (4,6 ч) Lu^{178} (20 мин)	β^-, γ ИП, γ $\varepsilon, \beta^-, \gamma$ β^-, γ β^-, γ
7	${}_{74}\text{W}^{182}$ (26,41)	2p (13,2) n_1p (14,65) p (7,14)	Hf^{180m} (5,5 ч) Ta^{180m} (8,1 ч) Ta^{182m} (16,5 мин)	ИП, γ $\varepsilon, \beta^-, \gamma$ ИП, γ
8	${}_{82}\text{Pb}^{204}$ (1,48)	$n_1\alpha$ (5,52) n (8,24) T (12,81) n_1p (14,34) 2n (15,17)	Hf^{199} (43 мин) Pb^{203} (52,1 ч) Tl^{201} (73 ч) Tl^{202} (12,2 дн) Pb^{202m} (3,61 ч)	ИП, γ ε, γ ε, γ ε, γ ИП, ε, γ
9	${}_{82}\text{Pb}^{206}$ (23,6)	He^2 (14,52)	Hg^{203} (46,56 дн)	β^-, γ
10	${}_{82}\text{Pb}^{208}$ (52,3)	$n_1\alpha$ (6,98) He^2 (14,52)	Hg^{203} (46,56 дн) Hg^{203} (5,5 мин)	β^-, γ β^-, γ

II группа – ускорители с максимальной энергией ускоренных электронов в диапазоне $100 \text{ МэВ} > E_0 > 10 \text{ МэВ}$. В таком случае фотоядерные реакции возможны с большинством изотопов, поэтому неизбежна активация веществ окружающей среды в рабочем помещении, в том числе и в воздухе.

7.5.3. Организация работ с применением источников ионизирующих излучений

1. Перечисленные выше факторы радиационной опасности являются базовой основой для организации условий безопасной работы с применением ускорителя электронов.

2. Помещения и установки, предназначенные для работ с применением ионизирующих излучений, до начала их эксплуатации должны быть приняты комиссией в составе представителей заинтересованной организации, органов Государственного санитарного надзора, технической инспекции заинтересованных сторон. Комиссия устанавливает соответствие применяемых объектов проекту и требованиям действующих норм и правил, наличие условий радиационной безопасности персонала и населения, решает вопрос о возможности эксплуатации объекта и получения учреждением источника ионизирующего излучения.

3. Комиссией составляется акт приемки, в котором для каждого помещения (участка) при работе с устройствами, генерирующими ионизирующее излучение (неизотопные источники), указывается: тип устройства, вид, энергия и интенсивность генерируемого ионизирующего излуче-

ния (или ускоряющее напряжение, сила тока, мощность и т. д.), максимально допустимое число одновременно работающих устройств и число устройств, размещенных в одном помещении (участке, территории).

Для всех работ указывается их вид и характер, а также ограничительные правила.

4. Проведение работ с источниками ионизирующих излучений разрешается только после оформления санитарного паспорта.

Санитарный паспорт на право работы с источниками ионизирующего излучения оформляют местные органы Госсанэпиднадзора (Роспотребнадзора) на основании акта приемки новых учреждений или акта санитарного обследования действующих учреждений.

Санитарный паспорт выдается на срок не более трех лет. По окончании этого срока паспорт оформляется по установленному порядку на новый срок.

5. В случае нарушения требований Правил технической эксплуатации и РБ (радиационной безопасности) органы Роспотребнадзора могут приостановить в учреждении работу с источниками ионизирующих излучений и отозвать (аннулировать) санитарный паспорт до истечения срока его действия.

6. Работа с источниками ионизирующих излучений разрешается только в помещениях, указанных в санитарном паспорте учреждения. Проведение работ, не связанных с применением источников излучения, в этих помещениях допускается только в случае, если они вызваны производственной необходимостью и предусмотрены в санитарном паспорте. На дверях каждого помещения должны быть указаны его назначение, класс проводимых в нем работ и знак радиационной опасности.

7. Администрация учреждения обязана определить перечень лиц, которые будут работать с источниками излучения, и обеспечить необходимое обучение и инструктаж.

8. Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал (группы А и Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

9. Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД), приведенные в табл. 7.5.2;
- дополнительные уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида);
- контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.), значения которых должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Таблица 7.5.2

Основные пределы доз

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год: в хрусталике глаза в коже в костях и стопах	150 мЗв	15 мЗв
	500 мЗв	50 мЗв
	500 мЗв	50 мЗв

10. Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

11. Для сравнения ПД с действовавшими ранее предельно допустимыми дозами облучения ниже приведена таблица ПДД.

Таблица 7.5.3

Предельно допустимые дозы

Нормируемая величина	Доза облучения в бэр(ПДД)	Доза облучения в Зивертах(ПД)
Эффективная доза в год	5 бэр	20 мЗв
Эффективная доза в месяц	0,416 бэр	1,661 мЗв
Эффективная доза в неделю	100 мбэр	0,4 мЗв
Эффективная доза в день	17 мбэр	64 мкЗв
Эффективная доза в час	2,8 мбэр	10,7 мкЗв

12. К непосредственной работе с источниками ионизирующих излучений допускаются лица не моложе 18 лет.

13. Лица, относящиеся к категории А (персонал), должны проходить обязательный медицинский осмотр при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры.

К работе допускаются лица, не имеющие медицинских противопоказаний. Это же требование распространяется на лиц, поступающих в учебные заведения, в том числе курсы, готовящие кадры для работы с источниками ионизирующих излучений. Администрация несет ответственность за своевременное прохождение медицинских осмотров.

14. До начала эксплуатации ускорителя администрацией должно быть организовано обучение персонала безопасным методам работы. Персонал должен знать инструкции по ТБ и РБ, уметь пользоваться за-

щитными приспособлениями и оборудованием, санитарно-техническими устройствами, знать правила личной гигиены. К работе на ускорителе допускаются лица, сдавшие экзамен комиссии, назначаемой руководителем учреждения из числа наиболее квалифицированных специалистов. Результаты сдачи экзаменов оформляются протоколом, утвержденным руководителем учреждения. Периодическая проверка знания персоналом должностных инструкций и инструкций по технике безопасности и радиационной безопасности должна проводиться не реже одного раза в год, результаты этих проверок должны фиксироваться в специальном журнале.

15. Ускоритель I группы может быть расположен в производственном помещении, а также на промышленной площадке. При этом радиационная защита ускорителя должна удовлетворять требованиям НРБ-99 и ОСПОРБ-99.

16. Ускоритель II группы должен размещаться в отдельном здании или отдельном крыле здания.

17. В учреждении, где ускоритель используется в стационарных условиях, должны быть предусмотрены следующие помещения:

- рабочая камера (бункер);
- пультовая;
- вспомогательные помещения, необходимые для нормальной работы ускорителя.

7.5.4. Организация работ при обслуживании установок, использующих напряжение выше 1000 В

1. К оперативному обслуживанию электроустановок могут допускаться лица, знающие их схемы, эксплуатационные инструкции, особенности оборудования, и прошедшие обучение и проверку знаний.

Лица оперативного персонала, обслуживающие электроустановки единолично, и старшие в смене и бригаде, закрепленные за данной электроустановкой, должны иметь квалификационную группу не ниже IV (в установках напряжением выше 1000 В) и III (в установках напряжением ниже 1000 В).

2. Лица, не имеющие отношения к обслуживанию данной электроустановки и не выполняющие работы по нарядам или распоряжениям, могут допускаться в помещение с электроустановкой напряжением выше 1000 В с разрешения административно-технического персонала в сопровождении и под надзором лица оперативного персонала с квалификационной группой не ниже III.

3. При поступлении на работу лица по обслуживанию электроустановок оно должно пройти вводный инструктаж.

4. Лица, обслуживающие электроустановки:

- не должны иметь болезней, мешающих производственной работе;
- должны пройти обучение безопасным методам работы на рабочем месте под руководством опытного работника и проверку знаний в квалификационной комиссии с присвоением определенной квалификационной группы;
- должны быть обучены приемам освобождения пострадавшего от электрического тока и правилам оказания первой помощи пострадавшим.

5. Лица, не достигшие 18-летнего возраста, не могут быть допущены к работам на электроустановках.

6. Практикантам институтов, техникумов, технических училищ, не достигшим 18-летнего возраста, разрешается пребывание в помещениях, где расположено электрооборудование, ограниченное время и под постоянным надзором опытного и квалифицированного работника. Допускать к самостоятельной работе практикантов, не достигших 18-летнего возраста, и присваивать им квалификационную группу III и выше запрещается.

7.5.5. Технические мероприятия по защите от ионизирующих излучений при работе на ускорителе электронов

Ускоритель представляет собой установку, в которой для получения быстрых заряженных частиц используется их ускорение в электромагнитном поле. Уровни излучений вблизи ускорителя достигают больших значений, опасных для человека, поэтому при организации работ на ускорителе он должен быть расположен в специальном помещении, обеспечивающем защиту от ионизирующих излучений.

Стены помещения изготавливаются из защитных материалов, обычно из бетона; толщина их может достигать нескольких метров. Потолок выполняется также из бетона и часто имеет разборный блок, через который производится доставка и монтаж ускорителя. Стены и потолок должны уменьшать дозы излучений до предельно допустимых значений.

Помещение с ускорителем, как правило, имеет лабиринтный вход и защитные двери, выполненные из стали.

При работе ускорителя в помещении в пучке электронов происходит ионизация воздуха, образуется озон, вредный для организма. Поэтому в помещении должна быть организована приточно-вытяжная вентиляция. Для вентиляции помещения, в котором установлен ускоритель, должна быть установлена вытяжная труба со специальным фильтром, а также приточная вентиляция.

Освещение рабочих мест в помещении должно быть усилено до 300 люкс, для аварийного случая должно быть предусмотрено аварийное освещение с независимым питанием. Ускоритель и пульт управления должны размещаться в различных помещениях. При этом на пульте управления и над входом в помещение с ускорителем устанавливается световая сигнализация, предупреждающая о включении ускорителя. Кроме этого, двери входа в помещение с ускорителем должны быть снабжены блокировкой, позволяющей отключать питание ускорителя при открытой двери.

При необходимости в помещении с ускорителем могут сооружаться временные или постоянные защитные стены или экраны. Их можно возводить из бетонных или свинцовых блоков с замковым сцеплением. Такие экраны легко собираются и разбираются. Защитные экраны должны иметь одинаковую толщину и не иметь пустот и щелей.

Толщину экрана d (см) для полного поглощения β -излучения с энергией E (МэВ) веществом плотности ρ (г/см³) можно оценить по формуле:

$$d = \frac{0,57E - 0,161}{\rho}. \quad (1)$$

Электроны, проходя через вещество, в результате взаимодействия с его атомами теряют энергию на ионизацию, возбуждение и тормозное излучение.

Тормозное излучение в виде гамма-лучей возникает при изменении скорости электронов в веществе. Тормозная способность вещества прямо пропорциональна числу атомов вещества N в см³ и его порядковому номеру z .

Часто определяющую роль в тормозной способности отводят порядковому номеру z вещества, однако при низком z , но большой плотности электронов вещество обладает высокой тормозной способностью, например, алмаз. Связь тормозной способности вещества с его плотностью определена формулой:

$$N_0 \rho \frac{Z}{A} = NZ, \quad (2)$$

где N_0 – число Авогадро; A – атомная масса.

При нерелятивистских энергиях пространственное распределение тормозного излучения описывается сравнительно просто, однако при энергиях, сравнимых с mc^2 , математическая трактовка значительно усложняется. Характерной особенностью области больших энергий является то, что основная часть излучения испускается в направлении вперед, образуя конус излучения. Это обстоятельство используется при работе на ускорителях электронов, когда необходимо преобразовать энер-

гию ускоренных электронов в узкий пучок проникающего излучения, направление которого почти совпадает с направлением движения электронов. При этом средний угол вылета кванта излучения при релятивистских энергиях равен:

$$\Theta = \frac{mc^2}{U_0}. \quad (3)$$

Таким образом, защита от ионизирующего излучения при работе на ускорителях электронов должна быть сконструирована с учетом максимальной энергии ускоренных электронов, интенсивности пучка электронов, максимального угла распространения рассеянного тормозного излучения, а также многократного рассеянного излучения, учитываемого фактором накопления:

$$B = \frac{D_0 + D_s}{D_0} = 1 + \frac{D_s}{D_0},$$

где D_0 и D_s – функции, описывающие поле излучения от нерассеянных и многократно рассеянных гамма-квантов соответственно.

Для различных веществ значение фактора накопления расположено в пределах 1,18...1,6, для энергий 2...6 МэВ.

В помещении для проведения лабораторной работы и исследований установлен бетатрон, и оно имеет соответствующую радиационную защиту. Стены бункера выполнены из бетона толщиной 1–2 метра. Расположено помещение ниже нулевой отметки первого этажа. Потолок имеет толщину более 3-х метров. В помещении имеется приточно-вытяжная вентиляция. Входные двери выполнены из стали.

7.5.6. Дозиметрическая аппаратура для контроля радиационной обстановки при работе ускорителя

1. Индивидуальный дозиметрический контроль

Индивидуальный контроль доз заключается в том, что систематически измеряется доза, получаемая за определенный промежуток времени при внешнем облучении каждым работающим в полях излучений. Осуществляется этот контроль с помощью небольших приборов карманного типа – индивидуальных дозиметров. В зависимости от метода регистрации излучений, на котором основан дозиметр, принято индивидуальный контроль доз подразделять на индивидуальный дозиметрический контроль ИДК, индивидуальный фотометрический контроль ИФК и индивидуальный люминесцентный контроль ИЛК.

Рассмотрим показывающий дозиметр. Показывающий дозиметр – это камера, внутри которой для измерения оставшегося заряда вмонтирован электромметр (см. рис. 7.5.1).

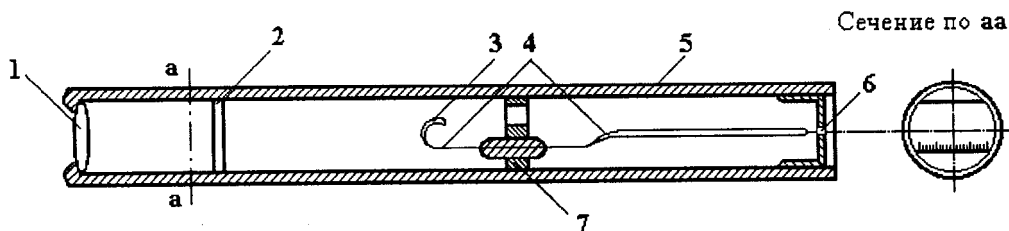


Рис. 7.5.1. Показывающий дозиметр:

- 1 – оптический вход; 2 – шкала для измерения отклонения нити;
3 – электрометр с кварцевой нитью; 4 – внутренний электрод;
5 – внешний электрод (корпус); 6 – мембрана для зарядки; 7 – изолятор*

Если на внутренний электрод камеры подать заряд, нить электрометра отклонится от нулевого положения. Под воздействием излучения величина заряда будет уменьшаться, и нить будет возвращаться в нулевое положение. С помощью оптической системы можно наблюдать за нитью и ее смещением. Отклонение нити электрометра пропорционально накопившемуся на ней заряду, то есть дозе. Шкала электрометра проградуирована в миллирентгенах, что позволяет непосредственно определять дозу, полученную камерой.

2. Контроль в лабораторных и производственных условиях

Измерение плотности потока ионизирующих излучений является необходимой задачей при работе с устройствами, создающими в районе своего расположения поля частиц или квантов. Знание параметров этих полей в различных точках пространства позволяет управлять этими устройствами и обеспечивать радиационную безопасность обслуживающего персонала. Этой цели служат приборы типа ДРГЗ-02, ДРГЗ-03 и другие радиометры и дозиметры.

Конструктивно дозиметры выполняются в виде двух узлов (блоков): пульта и блока детектирования, соединенных кабелем. Блок детектирования выполняется в виде стального корпуса, который служит защитой фотоэлектронного умножителя от магнитных полей. Блоком детектирования производится пропорциональное преобразование энергии гамма-излучения в энергию электрического тока. В качестве детектора, например, в дозиметре ДРГЗ-02, используется воздухоэквивалентный сцинтиллятор, представляющий собой суспензию сернистого цинка, активированного серебром, в сцинтиллирующей пластмассе на основе полистирола. Весовая доля сернистого цинка такова, что эффективный атомный номер последнего равен эффективному атомному номеру воздуха, то есть 7,64.

Интенсивность сцинтилляций регистрируется фотоэлектронным умножителем, работающим в токовом режиме. Импульсы тока ФЭУ интегрируются и поступают на УПТ и далее на регистрирующий прибор – стрелочный или цифровой. Диапазон измерения дозиметров охватывает

мощность экспозиционной дозы рентгеновского или гамма-излучения от 0 до 1000 мкР/с, то есть диапазон от 0 до $2,58 \cdot 10^7$ А/кг, и обеспечивает регистрацию гамма-излучения в диапазоне энергий от $3,2 \cdot 10^{-15}$ Дж (от 20 до 3000 кэВ).

7.5.7. Дозиметрический контроль в поле отраженного и рассеянного излучений в помещении с ускорителем и вне помещения

На рис. 7.5.2 представлен план размещения ускорителя с указанием мест для проведения измерений: точки А, Б, В, Г. Цель измерений состоит в том, чтобы определить мощность дозы внутри помещения: вблизи ускорителя (точка А), в отдалении (точка Б) и снаружи (точки В и Г). Внутри помещения измерение необходимо производить индивидуальным дозиметром. Снаружи – дозиметром ДРГЗ-02(ДРГ-03)

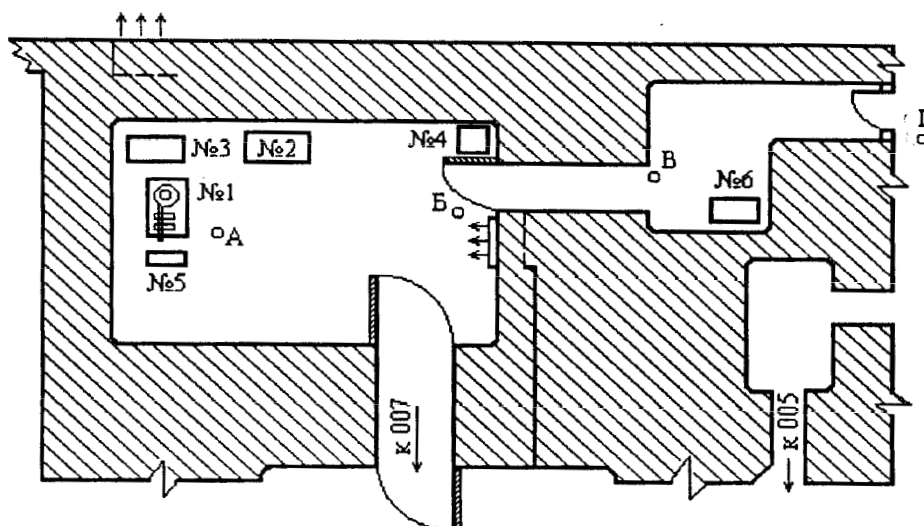


Рис. 7.5.2. План размещения ускорителя с указанием мест измерений:
1 – бетатрон; 2 – источник питания; 3 – стабилизатор; 4 – стойка;
5 – ионизационная камера; 6 – стол

7.5.8. Порядок выполнения работы

С помощью зарядного устройства зарядить индивидуальные показывающие дозиметры.

Произвести подготовку дозиметра ДРГЗ-02 (ДРГЗ-03) следующим образом:

1. Установить переключатель В1 в положение «УСТ. НУЛЯ», а переключатель В2 – в положение «НАКАЛ». Стрелка измерительного прибора должна установиться в пределах выделенного сектора. В противном случае снять дно пульта, и с помощью потенциометра «РЕГ. НАПР» на блоке питания установить стрелку прибора на правый край выделенного сектора.

2. Переключатель В2 установить в положение «АНОД». Стрелка измерительного прибора должна показывать на нижней шкале напряжение 7,5...9 В (предел измерения 30 В).

3. Установить переключатель В2 в положение «ИЗМЕРЕНИЕ».

4. Поместить блок детектирования в контролируемую зону.

5. Установить переключатель в необходимое для работы положение.

6. Закрыв световой затвор на блоке детектирования, ручкой «УСТ. НУЛЯ» произвести, при необходимости, подрегулировку нуля на шкале измерительного прибора.

Примечание. Проверку установки нуля дозиметра, в соответствии с п. 6, производить перед каждым измерением.

7. Открыв световой затвор, произвести отсчет показаний после выдержки в течение времени измерения по табл. 7.5.4.

Таблица 7.5.4

№ п/п	Поддиапазон (мкР/с)	Время измерения мощности экспозиционной дозы, с
1	0–0,1	10 ± 2
2	0–0,3	3 ± 1
3	Остальные	$1 \pm 0,5$

Для исключения влияния флуктуаций стрелки на наиболее чувствительных поддиапазонах, вызванных статическим характером излучения, рекомендуется производить 5–6 отсчетов с интервалом 5...10 с; показание в этом случае определяется как среднее арифметическое произведенных отсчетов.

8. Произвести измерения в точках А, Б, В, Г и необходимые расчеты.

9. Составить таблицу выполненных измерений.

7.5.9. Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Цель работы
3. Схематическое расположение точек измерения
4. Результаты измерений с указанием типов приборов
5. Анализ полученных результатов и выводы

Список использованных источников

1. Гусев Н.Г., Кимель Л.Р., Машкович В.П., Пологих Б.Г., Суворов А.П. Физические основы защиты от излучений. – Т. I. – М.: Атомиздат, 1969.
2. Булдаков Л.А., Гусев Д.И. и др. Радиационная безопасность в атомной энергетике. – М.: Атомиздат, 1991.

3. Нормы радиационной безопасности НРБ–99. – М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.
4. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с.

7.6. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки Томской области

7.6.1. АСКРО ТО. Цели и задачи работы

При выполнении данной лабораторной работы преследуются следующие цели:

- ознакомление с построением системы автоматизированного контроля радиационной обстановки;
- знакомство с работой АСКРО;
- овладение методикой измерения и обработки данных.

Основной задачей работы является дистанционная оценка радиационной обстановки (внешнее гамма-излучение) в зоне влияния Сибирского химического комбината. Это позволяет ознакомиться с одним из методов радиационного мониторинга окружающей среды, который применяется при экологическом контроле, а также при автоматическом контроле радиационной обстановки вокруг радиационно-опасных объектов ядерно-технологического цикла (ГОК, АЭС и т. п.).

7.6.2. Информация об АСКРО

На территории Томской области расположены два предприятия: Сибирский химический комбинат (СХК) и ядерный исследовательский реактор НИИ ядерной физики Томского политехнического университета, отнесенные Постановлением Правительства Российской Федерации к категории особо ядерно- и радиационно-опасных объектов.

По данным ЗапСибгидромета (г. Новосибирск), СХК является основным источником радиоактивного загрязнения окружающей среды на территории Томской области.

В 30-км зоне СХК расположено более 80 населённых пунктов с населением около 680 000 человек, в том числе города Томск и Северск. Кроме того, в нескольких километрах от реакторного и радиохимического заводов СХК находится одно из крупнейших в России предприятий – Томский нефтехимический комбинат.

За более чем сорокалетний период деятельности на СХК произошло более 30 аварийных инцидентов, причем пять из них (включая аварию 06.04.93 г.) относятся к третьему уровню по международной шкале событий на атомных станциях и квалифицируются как серьёзные про-

исшествия. Загрязнение территории атмосферными выбросами СХК уверенно зафиксировано на расстоянии до 30...40 км от промышленной зоны комбината.

За время работы комбината произошло значительное радиоактивное загрязнение береговой линии р. Томь ниже по течению от места сброса сточных вод СХК.

На территории СХК расположены 50 хранилищ жидких (ЖРО) и твердых радиоактивных отходов (РАО). Суммарная активность отходов, хранящихся в них, оценивается Госатомнадзором России в 125 миллионов Кюри (составляет примерно 2 черновыльских выброса).

Опасность представляет и хранение на территории комбината продуктов переработки, например, отвалного гексафторида урана, в том числе и тех нескольких сотен (или тысяч) тонн, которые получены при переработке и обогащении частично очищенного отработавшего топлива зарубежных АЭС и др.

Потенциальную опасность для загрязнения подземных вод может представлять крупномасштабное подземное захоронение ЖРО с общей активностью около 400 млн Кюри, осуществляющееся более 30 лет в водоносные горизонты.

На СХК хранится около 23 000 контейнеров с оружейными делящимися материалами, полученными из войсковых частей в связи с реализацией договоров СНВ-1, СНВ-2; их хранение до сих пор осуществляется в зданиях и сооружениях, характеристики которых в ряде случаев не соответствуют современным требованиям.

Учитывая планы развития СХК (возможное строительство завода по изготовлению МОКС-топлива, строительство реакторов ВВЭР-1000, работающих на МОКС-топливе), можно с уверенностью предполагать, что воздействие комбината на прилегающую территорию не только не уменьшится, но и будет возрастать.

Все опасные грузы на СХК везут по однопутной железнодорожной ветке, которая проходит и по городу Томску, в том числе в непосредственной близости от густонаселенных кварталов.

С целью получения оперативной информации о радиационной обстановке в реальном масштабе времени создана, функционирует и развивается первая в России территориальная Автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО).

На территории Томской области непосредственно после аварии на Сибирском химическом комбинате 6 апреля 1993 года было принято решение о создании автоматизированной системы контроля радиационной обстановки Томской области (АСКРО ТО).

В настоящее время система готова к интеграции в создаваемую Единую государственную АСКРО (ЕГАСКРО) и к международному обмену радиоэкологическими данными.

Создание АСКРО ТО начато по инициативе Государственного комитета экологии Томской области и Томского центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (ТЦГМС), при поддержке администрации Томской области и администрации г. Северска. Эксплуатация АСКРО ТО ведется сотрудниками ОГУ «Облкомприрода» и ТЦГМС.

Разработка и создание АСКРО ТО проведены сотрудниками НТЦ «РИОН» НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (г. Санкт-Петербург). Сервисное обслуживание системы осуществляет разработчик.

Основной целью создания АСКРО ТО является обеспечение органов государственного управления оперативной и достоверной информацией о радиационной обстановке в 30-км зоне СХК.

АСКРО ТО предназначена для информационно-аналитической поддержки действий органов государственной власти г. Томска, органов государственного регулирования безопасности: Томского управления Роспотребнадзора, служб системы государственного контроля за радиационной и экологической обстановкой: Центра Гидрометеослужбы в Томской области и ОГУ «Областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды», Главного управления по делам ГО и ЧС Томской области, направленных на обеспечение радиационной безопасности населения и окружающей природной среды.

Система обеспечивает:

- сбор данных от постов контроля в автоматическом или в ручном режимах, их обработку в реальном масштабе времени;
- оперативное представление информации на экране монитора;
- подачу тревожной сигнализации при обнаружении постами контроля превышения установленных порогов МЭД;
- подготовку выходных документов и отчетов за установленные промежутки времени;
- ведение базы данных за весь период работы;

Структура АСКРО выполнена по радиально-узловому принципу и содержит следующие функциональные узлы:

- три центра сбора и обработки информации (ЦСОИ), из них первый размещен в ОГУ «Облкомприрода», второй в ТЦГМС, и третий – в администрации г. Северск;
- распределенную общую измерительную сеть из 26 постов контроля.

Часть постов расположена непосредственно в ЗАТО Северск вблизи опасных предприятий, часть постов кольцом охватывает ЗАТО с радиусом примерно 15 км.

Центры обработки информации работают независимо друг от друга. Каждый пост измеряет мощность экспозиционной дозы гамма-излучения через определенные промежутки времени (одна, две, четыре или восемь минут), запоминает измеренные значения и передает их в центр по имеющейся телефонной сети один или несколько раз в сутки по установленной в компьютере программе, или по запросу оператора.

В случае ухудшения радиационной обстановки и превышения установленного порогового значения мощности дозы, пост самостоятельно выходит на связь с центром и включает сирену, которая отключается только после снятия показаний дежурным оператором. Кроме того, пост может сообщить о несанкционированном доступе, о выходе из строя, об обрыве кабеля и проч.

АСКРО имеет возможность расширения своих функций за счет подключения к постам автоматических датчиков химического загрязнения воздуха, датчиков метеобстановки (направление и скорость ветра, температура, давление и влажность), а также информационных табло типа «бегущая строка», что предусмотрено планом развития системы и уже частично выполнено.

В дальнейшем АСКРО всех областей России составят Единую Государственную систему контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО) на территории Российской Федерации. Аппаратные и программные средства АСКРО Томской области совместимы с техническим заданием на ЕГАСКРО.

Посты АСКРО ТО планируется дополнять датчиками содержания в атмосферном воздухе альфа- и бета-излучающих радионуклидов, а также датчиками химического загрязнения воздуха по фтору, трибутилфосфату, окислам серы, азота, углерода.

АСКРО ТО позволяет:

- совершенствовать государственный контроль радиационной обстановки на территории Томской области для своевременного выявления ее изменений;
- оперативно обеспечивать органы государственной власти Российской Федерации и Томской области, органы федерального управления и надзора в области радиационной безопасности населения достоверной информацией о текущем и ожидаемом состояниях радиационной обстановки, фактах, характере, масштабах и прогнозах возможных последствий ее ухудшения;

- обеспечивать информацией системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях;
- информировать население о радиационной обстановке на соответствующей территории, о ситуации: люди должны знать, что случилось, какие могут быть последствия и какие планируются мероприятия;
- предотвращать распространение слухов и противоречивой информации;
- организовывать проведение оперативных мероприятий в случае угрозы возникновения радиационной аварии.

Пост контроля (ПК)

Аппаратура поста контроля состоит из устройства накопления УСПД, выносного датчика МЭД гамма-излучения УДРГ-50, размещаемого в наружных условиях на открытой местности. Дополнительно могут устанавливаться датчик направления и скорости ветра М-127М или М-128М, информационное табло «бегущая строка» для показа последнего значения МЭД и сообщений из центра, радиостанция (при организации радиосети).

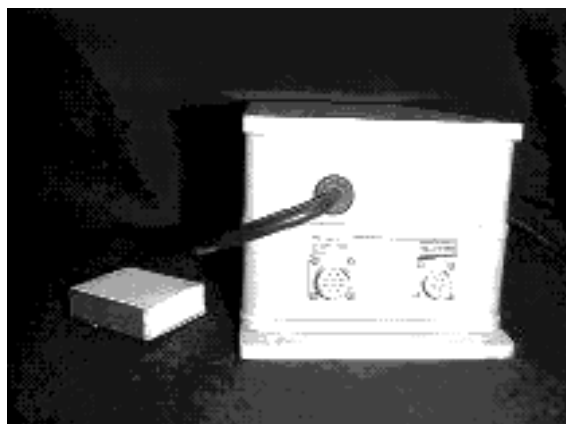


Рис. 7.6.1. Устройство сбора и передачи данных (УСПД)

Устройство сбора и передачи данных (УСПД) предназначено для приема, первичной обработки и передачи по каналу связи (АТС, радио, физическая пара) данных от датчиков физических величин в составе автоматизированных систем контроля различного назначения. Применяется как базовое устройство при построении постов контроля (ПК) АСКРО совместно с радиационным датчиком типа УДРГ-50, с метеодатчиком направления и скорости ветра типа М-127м (М-128), с измерителем температуры, влажности и давления воздуха (метеометром) типа МЭС-6, с информационным табло «бегущая строка», в составе станции контроля загрязнения атмосферы.

Технические характеристики:
Количество счетных каналов 4;
Максимальное удаление датчика от устройства УСПД, м, до 500;
Устанавливаемая экспозиция, с, 512, 256, 128, 64;
Время хранения информации без потери данных (от одного датчика УДРГ-50 при экспозиции 512 с), час, 120;
Диапазон рабочих температур, °С, от –30 до +50;
Габаритные размеры, мм, 230 × 130 × 180.



Рис. 7.6.2. Датчик мощности экспозиционной дозы УДРГ-50

Датчик мощности эквивалентной (экспозиционной) дозы предназначен для работы на открытой местности в составе поста контроля (ПК) региональной и объектовой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО). Может быть использован в качестве комплектующего изделия для построения ядерно-физических измерительных систем различного назначения.

Технические характеристики:

вид регистрируемого излучения – гамма – (фотонное);
энергетический диапазон регистрируемого излучения, МэВ, 0,05...1,5;
диапазон измерения МЭД: от 0,1 мкЗв/ч до 0,5 Зв/ч; от 10 мкР/ч до 50 Р/ч;

основная погрешность измерения мощности эквивалентной дозы при доверительной вероятности 0,95:

- в диапазоне 10...120 мкР/час, %, 20,
- в диапазоне выше 120 мкР/час, %, 15;

энергетическая зависимость чувствительности в диапазоне энергий от 0,05 до 1,5 МэВ, %, 30;

температура окружающей среды, °С, от –50 до +50;

масса, кг, 1,2;

зарегистрирован в Государственном реестре средств измерения под № 15994-97.

Пост контроля принимает по каналу связи установки от центра (время экспозиции, пороговое значение МЭД, телефон центра, либо код по радиоканалу). При превышении установленного порога, УСПД переходит в активный режим работы и само выходит на связь с центром. Передаваемые данные от поста имеют необходимую диагностику о его работоспособности.

Уставки поста контроля имеют защиту от несанкционированного доступа, но могут быть в любое время изменены оператором из центра данной системы. Кроме того, оператор может установить в ПК передачу активных сообщений на другой центр.

В УСПД имеется возможность прямого считывания накопленной информации по каналу RS-232C, а также полной диагностики его работоспособности.

Центр сбора и обработки информации (ЦСОИ)

Центр сбора и обработки информации (ЦСОИ) состоит из контроллера КСК, радиостанции (при наличии радиосети) и персонального компьютера.

Контроллер КСК является интеллектуальным системным контроллером аппаратного комплекса, полностью совместимого с отраслевой системой «Рефлекс» Министерства (Госкомитета) РФ по атомной энергии. Обеспечивает прием данных от ПК по каналам городской или междугородной телефонной связи, а также по радиоканалу и по выделенным некоммутируемым кабельным линиям. КСК предназначен для работы в составе центра сбора и обработки информации (ЦСОИ) региональных, либо объектовых систем АСКРО с постами контроля (ПК), оборудованными блоками УСПД.



Рис. 7.6.3. Контроллер связи КСК

КСК обеспечивает в оперативном и «автономном» режимах установление связи и сбор данных по каналам связи, накопление и первичную обработку данных от ПК, установление связи и считывание оперативных данных с других КСК.

КСК предназначен для работы в составе центра сбора и обработки информации (ЦСОИ) региональных, либо объектовых систем АСКРО с постами контроля (ПК), оборудованными блоками УСПД.

Контроллер КСК является интеллектуальным системным контроллером аппаратного комплекса, полностью совместимого с отраслевой системой «Рефлекс» Министерства (Госкомитета) по атомной энергии РФ.

Обеспечивает прием данных от ПК по каналам городской или междугородной телефонной связи, а также по радиоканалу и по выделенным некоммутируемым кабельным линиям.

Позволяет обеспечить наблюдение за радиационной обстановкой без организации дежурной службы, и в необслуживаемый период суток (ночное время).

Технические характеристики:

время непрерывной работы круглосуточно;

удаление от компьютера, м, 15;

используемые каналы связи АТС, радио, физическая пара.

электропитание КСК:

- от сети переменного тока напряжением, В, 220 ± 22 ;
 - от внешнего источника постоянного тока, В, от 9 до 34;
- температура окружающей среды, °С, от -10 до +50.

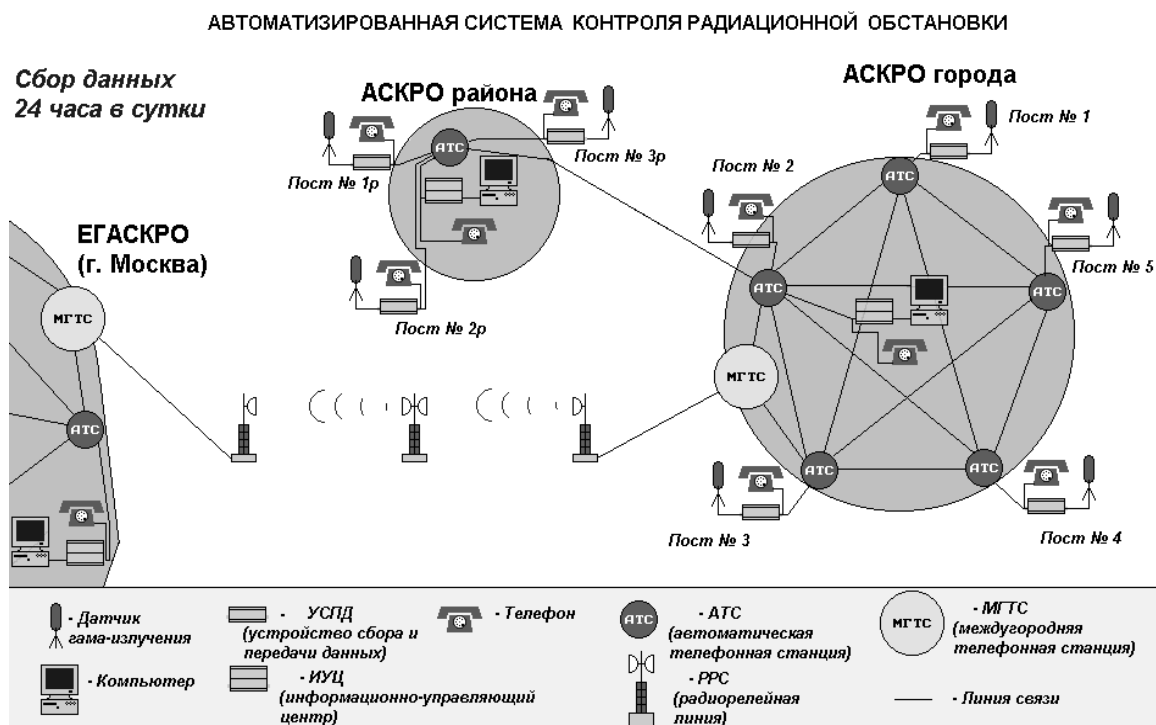


Рис. 7.6.4. Принцип построения АСКРО

Автоматизированная система контроля радиационной обстановки Томской области АСКРО ТО

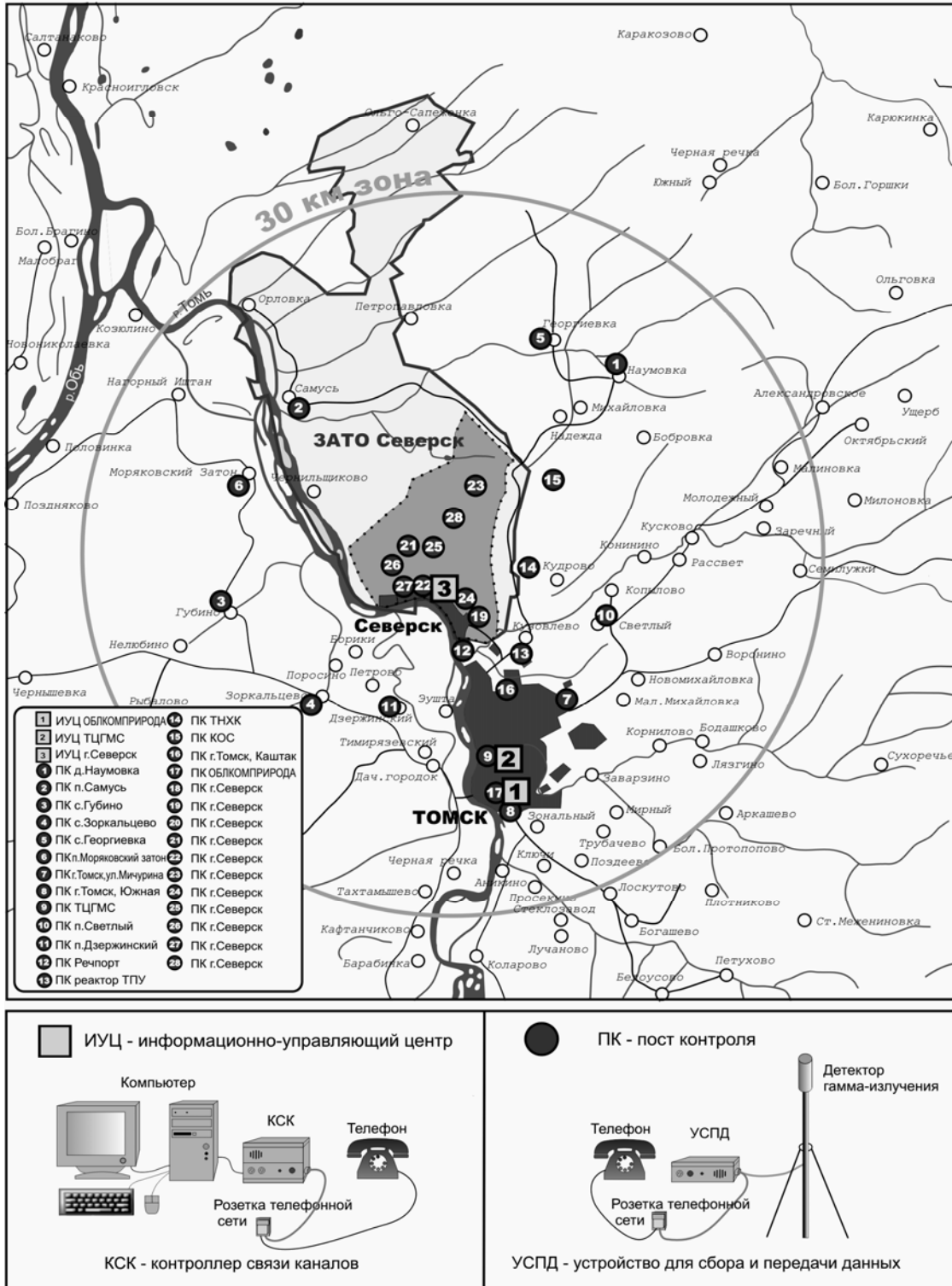


Рис. 7.6.5. АСКРО Томской области

На рис. 7.6.4 и 7.6.5 представлены общая схема построения АСКРО ТО и схема расположения постов контроля в 30-км зоне СХК.

7.6.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с устройством и работой АСКРО ТО по рис. 7.6.4 и 7.6.5.
2. Ознакомиться с компьютерной программой управления АСКРО ТО.
3. Опросить один пост контроля (например, посёлки Губино, Наумовка, Светлый, Моряковский Затон, пост ОГУ «Облкомприрода»).
4. Опросить КСК Томского Центра гидрометеослужбы в Томской области (ТЦГМС).
5. Подготовить отчет и ввести результаты отчета в базу данных на сайте ОГУ «Облкомприрода» <http://green.tsu.ru/gis/>.
6. Подготовить отчет с поста «Реактор Спутник» за период времени, заданный преподавателем, записать эти данные в файл и распечатать. Построить график зависимости МЭД от времени. Рассчитать среднее значение $\langle H \rangle$, среднее квадратическое отклонение МЭД от среднего значения σ , найти максимумы (выбросы) и сравнить с уставкой МЭД, равной 60 мкР/час.

Среднее значение МЭД:

$$\langle H \rangle = \sum_{i=1}^k H_i / k.$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{1/k \times (k-1) \times \sum_{i=1}^k (H_i - \langle H \rangle)^2}.$$

7. Сделать выводы о радиационной обстановке за указанный промежуток времени.

7.6.4. Вопросы к защите лабораторной работы

1. Принцип построения АСКРО.
2. Структура АСКРО Томской области.
3. Компьютерная программа управления АСКРО ТО, ее возможности.
4. Операции по опросу постов и составлению отчетов.

7.6.5. Содержание отчета

1. Необходимость сооружения АСКРО.
2. АСКРО Томской области (рис. 7.6.5).
3. Цели и задачи работы.
4. Выполняемая работа:
 - описание операций опроса и подготовки отчетов (посёлки Губино, Наумовка, Светлый, Моряковский Затон, пост ОГУ «Облкомприрода», КСК Томского Центра гидрометеослужбы);

- опрос и отчет с поста «Реактор», печать отчета за указанный в методичке промежуток времени. Построение графика зависимости МЭД от времени;
- расчет среднего значения, среднеквадратического отклонения МЭД от среднего, сравнение максимумов (выбросов) с уставкой МЭД в 60 мкР/ч;
- выводы о радиационной обстановке за указанный промежуток времени.

Список использованных источников

1. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки Томской области (АСКРО ТО). Техническое описание.
2. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки Томской области (АСКРО ТО). Инструкция по эксплуатации.

ГЛАВА 8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

8.1. Обработка результатов радиационного эксперимента

8.1.1. Цель работы

Изучить методы сглаживания и аппроксимации экспериментальных данных.

8.1.2. Задание

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Провести измерение зависимости мощности дозы от толщины поглощающих пластин из заданного материала при использовании источника электронного излучения – бетатрона МИБ-6.
3. Используя готовую программу обработки, одним из методов наименьших квадратов, получить результат вычисления коэффициента ослабления и график аппроксимирующей функции.

8.1.3. Теоретическая часть

1. Сглаживание измеренных данных эксперимента

В процессе экспериментальных измерений неизбежно допускаются погрешности, поэтому полученные результаты отличаются от теоретических. Чтобы свести к минимуму отклонения, вызванные случайной погрешностью, применяют сглаживание полученных данных, т. е. замену таблицы значений, составленной на основе эксперимента, новой таблицей опытных значений близких к ним точек, лежащих на достаточно гладкой кривой. Сглаживание осуществляют с помощью многочленов, приближающих по методу наименьших квадратов выбранные группы экспериментальных значений. Сглаживание производят как выборочное, так и скользящее по всем экспериментальным данным. Поскольку наилучшее сглаживание получается для средних значений (когда учитывается информация о поведении функции по обе стороны от сглаживающей точки), то количество значений для сглаживания выбирают нечетным.

Выборочное сглаживание проводят обычно для одного-двух значений, вышедших за пределы предполагаемой функции. Скользящее сглаживание производят тогда, когда выравнивание необходимо для всех значений.

Сглаживание скользящим средним значением производят многочленами, содержащими нечетное число точек, начиная с трех. Например, сглаживание скользящим средним по пяти точкам проводят следующим образом: берут пять первых точек $y_1; y_2; y_3; y_4; y_5$ и сглаживают с их помощью среднюю точку y_3 , затем берут следующую группу $y_2; y_3; y_4; y_5; y_6$ и сглаживают точку y_4 , и так до конца всех значений. Сглаживание производят как линейными многочленами, так и нелинейными.

Формулы сглаживания по трем и пяти точкам линейного многочлена:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{3}(y_{-1} + y_0 + y_1); \quad (1)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{5}(y_{-2} + y_{-1} + y_0 + y_1 + y_2). \quad (2)$$

Основные свойства скользящих средних сводятся к следующему:

- скользящие средние уменьшают нерегулярность колебания в ряде.
- скользящие средние смещают сглаженные значения.
- скользящие средние не дают начальные и конечные значения ряда (начало и конец таблицы).

Существуют различные способы еще лучшего сглаживания. Можно, например, использовать повторное сглаживание; формулы «неискажающие», у которых опасность смещений мала, содержат отрицательные члены, или для заполнения концов таблицы можно применять несимметричные формулы, обладающие свойствами малого смещения.

Пятичленные формулы, обладающие указанными свойствами, приведены ниже:

$$Y_0 = \frac{1}{35}(-3y_{-2} + 12y_{-1} + 17y_0 + 12y_1 - 3y_2), \quad (3)$$

$$Y_1 = \frac{1}{35}(2y_{-2} - 8y_{-1} + 12y_0 + 27y_1 + 2y_2), \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{1}{70}(-y_{-2} + 4y_{-1} - 6y_0 + 4y_1 + 69y_2). \quad (5)$$

Формула (3) предназначена для основной части таблицы, а (4) и (5) – для подсчета двух последних значений таблицы. Формулу для Y_{-1} выводят из (4) при записи y_2 вместо y_{-2} ; y_1 вместо y_{-1} ; y_{-1} вместо y_1 и y_{-2} вместо y_2 . Формулу для Y_{-2} получают заменой индексов в (5).

С помощью более длинных формул, вообще говоря, можно добиться большего сглаживающего эффекта. Для этого предлагаются следующие семичленные формулы:

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= \frac{1}{21}(-2y_{-3} + 3y_{-2} + 6y_{-1} + 7y_0 + 6y_1 + 3y_2 - 2y_3) \\ Y_1 &= \frac{1}{42}(y_{-3} - 4y_{-2} + 2y_{-1} + 12y_0 + 19y_1 + 16y_2 - 4y_3) \\ Y_2 &= \frac{1}{42}(4y_{-3} - 7y_{-2} - 4y_{-1} + 6y_0 + 16y_1 + 19y_2 + 8y_3) \\ Y_3 &= \frac{1}{42}(-2y_{-3} + 4y_{-2} + y_{-1} - 4y_0 - 4y_1 + 8y_2 + 39y_3) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Оптимальные сглаживающие формулы с числами членов 5, 7, 9, 11, 13, 15 можно составить, используя веса коэффициентов k , приведенных в табл. 8.1.1. Формулы симметричны, коэффициент k_0 соответствует центральному «весу», а k_1 – каждому из весов, примыкающих слева и справа, и т. д.

Таблица 8.1.1

*Коэффициенты оптимально сглаживающих формул
скользящего среднего*

Число членов в формуле						
	5	7	9	11	13	15
kk_0	0,559441	0,412587	0,331140	0,277945	0,240057	0,211541
kk_1	0,293706	0,293706	0,266557	0,238693	0,214337	0,193742
kk_2	-0,073427	0,058741	0,118470	0,141267	0,147356	0,145904
kk_3		-0,058741	-0,009873	0,035723	0,065492	0,082918
kk_4			-0,040724	-0,026792	0,000000	0,024027
kk_5				-0,027864	-0,027864	-0,014134
kk_6					-0,019350	-0,024499
kk_7						-0,013730

Результат сглаживания зависит от применяемых формул, выбор которых подсказывается скорее позицией, чем какими-либо правилами.

Сглаживание линейными многочленами приводит к результатам, по виду функций которых трудно признать, что они полностью «сглаженные», так как вид у них получается волнообразный. Поэтому для получения гладких функций часто применяют нелинейные функции – сплайны. *Сплайн* – это кривая, состоящая из отрезков полиномиальных кривых, которые состыкованы так, что производные полученной функции непрерывны на всем рассматриваемом промежутке. При многочленах относительно низкой степени часто можно избежать явно волнообразного поведения функции, которое характерно для случаев сглаживания большого числа эмпирических наблюдений единственным многочленом.

Обычно решение сводится к сплайн-интерполяции. Это кубическая сплайн-функция, удовлетворяющая условиям $s''(x_1) = s''(x_n) = 0$, назы-

ваемая естественным кубическим сплайном. С математической точки зрения (Алберг и др. Теория сплайнов и ее приложения. М.: Мир, 1972) доказано, что она является единственной функцией, обладающей свойством минимальной кривизны, среди всех функций, интерполирующих данные точки и имеющих квадратично интегрируемую вторую производную. В этом смысле естественный кубический сплайн есть самая гладкая из функций, интерполирующих заданные точки.

Рассмотрим множество точек на плоскости, координаты которых соответствуют рассматриваемым данным $[a, f(a)]$, $[b, f(b)]$, $[c, f(c)]$, $[d, f(d)]$, и предположим, что уже найден многочлен степени три или ниже, кривая которого проходит через точки $[a, f(c)]$ и $[b, f(b)]$. Теперь нам нужно подобрать нелинейный многочлен, например, третьей степени:

$$y = A + B(x - b) + C(x - b)^2 + D(x - b)^3, \quad (7)$$

кривая которого проходила бы через точки $[b, f(b)]$ и $[c, f(c)]$.

Необходимо определить значения четырех констант A , B , C и D , а значения $f(b)$ и $f(c)$ рассматриваются как два ограничения. Теперь мы имеем четыре уравнения, которым должны удовлетворять неизвестные A , B , C и D .

Имеем:

$$\left. \begin{aligned} f(b) &= A \\ f(c) &= A + B(c - b) + C(c - b)^2 + D(c - b)^3 \\ f'(b) &= B \\ f''(b) &= 2C \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тогда:

$$\left. \begin{aligned} A &= f(b) \\ B &= f'(b) \\ C &= \frac{1}{2} f''(b) \\ D &= \left\{ f(c) - A - B(c - b) - C(c - b)^2 \right\} / (c - b)^3 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Теперь можно осуществить интерполяцию между значениями b и c . Когда этот этап выполнен, мы переходим к построению следующего отрезка кривой, проходящего через значения $f(c)$ и $f(d)$. Для этого необходимо вычислить тангенс угла наклона и значение второй производной нашего многочлена в точке $x = c$, а именно:

$$\left. \begin{aligned} f'(c) &= B + 2C(c - b) + 3D(c - b)^2 \\ f''(c) &= 2C + 6D(c - b) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Когда параметры A , B , C , D найдены, это значит, что сплайн-полиномы полностью заданы, и теперь для любого значения x можно рассчитать соответствующие интерполяционные значения y .

Пример

Применим метод сглаживания сплайнами к результатам наблюдений, приведенным в табл. 8.1.2, где y – наблюдаемое значение.

Таблица 8.1.2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Набл. y	95	638	191	419	278	381	384	665	477
№ п/п	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Набл. y	1015	1093	860	779	862	951	866	1109	1291
№ п/п	19	20	21	22	23	24	25	26	27
x	53	54	55	56	57	58	59	60	61
Набл. y	1274	1579	1873	1482	2002	2011	2827	1722	2492
№ п/п	28	29	30	31	32	33	34	35	36
x	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Набл. y	3374	2735	2731	4323	4926	4114	4099	5835	6103

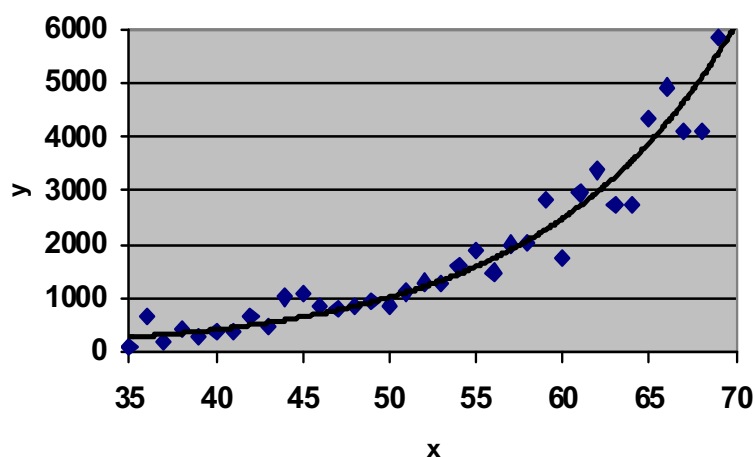


Рис. 8.1.1. Наблюдаемая зависимость по данным табл. 8.1.2

Полностью полученная кривая показана на рис. 8.1.1.

На основе полученных данных табл. 2 предположим, что можно получить гладкую кривую, если взять значения скользящих средних в точках $x = 37$, $x = 42$ и $x = 55$ и исходное значение в точке $x = 69$. Проведем сплайн-кривую через эти точки, а именно:

x	y
37	324
42	584
55	1642
69	5835

Представляется удобным отрезок прямой в промежутке между $x = 37$ и $x = 42$. В этом случае тангенс угла наклона в точке $x = 42$ равен $(584 - 324)/5 = 52$, а вторая производная в этой точке равна нулю. Теперь подберем многочлен третьей степени для отрезка между $x = 42$ и $x = 55$. Из формул (9) получаем:

$$A = 55; B = 52; C = 0;$$

$$D = (1642 - 584 - 52 \times 13 - 0 \times 13^2) / 13^3 = 0,1738734. \quad (11)$$

Теперь с помощью формулы (7) можно выполнить интерполяцию для промежутка между $x = 42$ и $x = 55$.

Для того чтобы определить следующий отрезок кривой, необходимо вычислить тангенс угла наклона и значение второй производной в точке $x = 55$. В соответствии с формулой (10) получаем:

$$A = 1642; B = 40,15381; C = \frac{1}{2} \times 13,562125 = 6,781063; \quad (12)$$

$$D = (5385 - 1642 - 40,15381 \times 14^2) / 14^3 = 0,3286291. \quad (13)$$

Теперь можно перейти к интерполяции значений в промежутке между 55 и 69. Значение в точке $x = 70$ получают экстраполяцией последнего отрезка кривой, а значения в точках $x = 35$ и $x = 36$ – экстраполяцией начального прямолинейного отрезка кривой.

В данном примере произведен произвольный выбор опорных точек, однако исследователь может изменить абсциссы и ординаты рассматриваемых узлов для того, чтобы получить оптимальную кривую относительно выбранного необходимого критерия.

2. Определение параметров эмпирических формул методом наименьших квадратов

Линейная регрессия

Обработка экспериментальных данных, особенно при измерении какой-либо зависимости, почти всегда сводится к отысканию аналитического вида формулы и параметров, входящих в нее. Экспериментальные точки, соединенные отрезками прямых линий на графике, составляют ломаную линию, которую трудно понять и идентифицировать с отыскиваемой функциональной зависимостью. Кроме этого, ее форма может и не повториться при повторном измерении, так как каждый результат измерения сопровождается ошибками. График искомой функции не должен проходить через все точки, а должен по возможности сглаживать шум. Отклонения, составляющие шум, являются собой регрессию к ожидаемой зависимости и могут быть линейными и нелинейными. Для линейной функции выбирают эмпирическую функцию определенного типа, например:

$$y = ax + b, y = a \cdot e^{bx} + c, y = a + b \sin(ax + \varphi) \text{ и т. д.} \quad (14)$$

Вид формулы может быть известен заранее из теоретических соображений или из соображений простоты аналитического представления эмпирического материала. В (14) определению подлежат параметры a, b, c . Параметров, подлежащих определению, может быть больше, это зависит от принятого вида формулы. Обозначим выбранную функцию как

$$y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_n). \quad (15)$$

Параметры, подлежащие определению: a_0, a_1, \dots, a_n . Метод наименьших квадратов позволяет получить несмещенные состоятельные оценки. Если эти параметры входят в формулу линейно, оценки параметров, получаемые по методу наименьших квадратов, являются также и эффективными. При этом предполагается, что измеренные значения функции y_i независимы и подчиняются нормальному закону распределения. Метод наименьших квадратов состоит в том, что параметры a_0, a_1, \dots, a_n определяются из условия, чтобы сумма квадратов отклонений измеренных значений y_i от расчетных или аппроксимированных $f(a_0, a_1, \dots, a_n)$ была минимальной, т. е.:

$$S = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_n)]^2 \rightarrow \min. \quad (16)$$

Возьмем, например, линейную аппроксимацию:

$$y = a + b \cdot x \quad (17)$$

Сумму квадратов разностей экспериментальных значений y и соответствующих точек на аппроксимирующей прямой можно записать следующим образом:

$$S = \sum (y_{\text{эксп}} - y_{\text{теор}})^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx)]^2. \quad (18)$$

Для каждого минимума S приравняем к нулю частные производные от S по a и b :

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) \cdot x_i = 0.$$

Деление общих уравнений на (-2) , раскрытие скобок и приведение подобных при параметрах a и b дает:

$$\sum_{i=1}^n y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i = a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2.$$

Обозначим: $S_1 = n$; $S_2 = \sum_{i=1}^n x_i$; $S_3 = \sum_{i=1}^n y_i$; $S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^2$; $S_5 = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i$.

Получим:

$$\begin{aligned} S_3 &= S_1 \cdot a + S_2 \cdot b, \\ S_5 &= S_2 \cdot a + S_4 \cdot b. \end{aligned} \quad (21)$$

По экспериментальным данным можно вычислить суммы $S_1 \div S_5$ и решить систему уравнений относительно a и b :

$$\begin{aligned} a &= \frac{S_3 \cdot S_4 - S_5 \cdot S_2}{S_1 \cdot S_4 - S_2 \cdot S_2}; \\ b &= \frac{S_1 \cdot S_5 - S_2 \cdot S_3}{S_1 \cdot S_4 - S_2 \cdot S_2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Ошибка определения параметров регрессии определяется формулами:

$$D = n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = N \cdot S_4 - S_2^2; \quad (23)$$

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 / (n-2)} = \sqrt{S / (n-2)}. \quad (24)$$

Для a ошибка равна: $T \cdot \sqrt{S_4 / D}$, для b — $T \cdot \sqrt{N / D}$.

Нелинейная регрессия

При нелинейной регрессии возможны случаи, когда параметры в эмпирическую функцию входят нелинейно ($y = a \cdot x^b$), либо когда аргумент входит в формулу нелинейно: $y(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$. В этих случаях формулу преобразуют к линейной от параметров или используют оптимизационные методы решения уравнений.

Метод выравнивания

Выравниванием называется преобразование эмпирической формулы:

$$y = f(x; a, b) \quad (25)$$

к виду:

$$Y = a_1 X + b_1 \quad (26)$$

путем подходящей замены переменных. Параметры a_1 и b_1 преобразованной формулы находят по формулам (22), а затем уже по ним пересчитывают интересующие нас параметры a и b .

Примеры

1. Для отыскания параметров степенной функции $y = ax^b$ (27) применяют логарифмическое преобразование $y = \ln a + b \ln x$ и замену $X = \ln x$, $Y = \ln y$, что дает:

$$Y = a_1 X + b_1, \quad (28)$$

где $a_1 = b$, $b_1 = \ln a$. Конечные выражения после преобразований имеют вид:

$$a = \exp \left[\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln y_i - b \sum_{i=1}^N \ln x_i \right) \right]; \quad (29)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N \ln x_i \sum_{i=1}^N \ln y_i - N \sum_{i=1}^N \ln x_i \ln y_i}{\left(\sum_{i=1}^N \ln x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N (\ln x_i)^2}. \quad (30)$$

2. При отыскании параметров показательной функции

$$y = ae^{bx} \quad (31)$$

применяют логарифмическое преобразование $\lg y = \lg a + b \lg x$ и замену $X = x$, $Y = \lg y$. Это приводит к линейной зависимости:

$$a_1 = b \lg e, \quad b_1 = \lg a,$$

что приводит к решению системы уравнений, из которой можно получить значения a и b .

$$N \lg a + \lg b \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N \lg y_i, \quad (32)$$

$$\lg a \sum_{i=1}^N x_i + \lg b \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N (x_i \lg y_i).$$

3. При отыскании экспоненциальной функции $y = a \exp (bx)$ применяют логарифмическое преобразование $Y = \ln y$, $a_1 = \ln a$, что дает:

$$Y = a_1 + bx \quad (33)$$

и соответственно

$$a_1 = \exp \left[\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right) \right], \quad (34)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N \ln y_i - N \sum_{i=1}^N x_i \ln y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2}.$$

Полиномиальный метод

В случаях, когда в качестве эмпирической формулы используются многочлены, возникает задача выбора оптимальной степени многочлена: многочлен слишком низкой степени будет давать слишком грубое описание эмпирического материала, а многочлен высокой степени не будет сглаживать «шум». В частности, если степень многочлена равна $N - 1$, то многочлен точно описывает все данные точки и сохраняет весь «шум».

Допустим, нам необходимо для совокупности точек (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots$ подобрать полиномиальную кривую. Можно начать с прямой линии, а если результаты подгонки будут неудовлетворительными, то можно перейти к квадратичной зависимости. Если и в этом случае кривая будет плохо по-

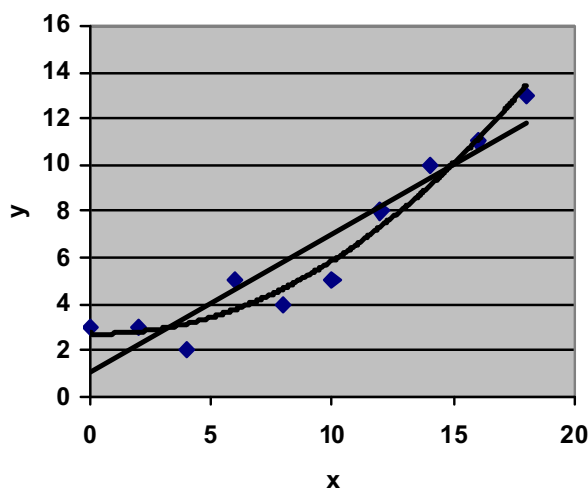


Рис. 8.1.2. Прямолинейная и параболическая аппроксимации

Рассмотрим для этого расположения точек две эмпирические зависимости: прямолинейную и параболическую.

Для прямолинейной зависимости

$$y_3 = a + bx \quad (41)$$

система уравнений имеет вид после почленного суммирования:

$$na + b \sum_{k=1}^n x_k = \sum_{k=1}^n y_k, \quad (42)$$

$$a \sum_{k=1}^n x_k + b \sum_{k=1}^n x_k^2 = \sum_{k=1}^n x_k y_k,$$

коэффициенты при этом выбираются из табл. 8.1.4.

Таблица 8.1.4

k	x_k	x_k^2	y_k	$x_k y_k$
1	0	0	3	0
2	2	4	3	6
3	4	16	2	8
4	6	36	5	30
5	8	64	4	32
6	10	100	5	50
7	12	144	8	96
8	14	196	10	140
9	16	256	11	176
10	18	324	13	234
Σ	90	1140	64	772

Имеем

$$\begin{cases} 10a + 90b = 64 \\ 90a + 1140b = 772 \end{cases} \quad (43)$$

Решение этой системы приводит к функции (см. рис. 2):

$$y_3 = 1,054 + 0,594x \quad (44)$$

Для параболической зависимости:

$$y_3 = a + bx + cx^2 \quad (45)$$

составляем табл. 8.1.5, причем для уменьшения складываемых чисел вводим переменную $u = \frac{x}{2}$.

Таблица 8.1.5

k	u_k	u_k^2	u_k^3	u_k^4	y_k	$u_k y_k$	$u_k^2 y_k$
1	0	0	0	0	3	0	0
2	1	1	1	1	3	3	3
3	2	4	8	16	2	4	8
4	3	9	27	81	5	15	45
5	4	16	64	256	4	16	64
6	5	25	125	625	5	25	125
7	6	36	216	1296	8	48	288
8	7	49	343	2401	10	70	490
9	8	64	512	4096	11	88	704
10	9	81	729	6561	13	117	1053
Σ	45	285	2025	15333	–	386	2780
–	x_k	x_k^2	x_k^3	x_k^4	y_k	$x_k y_k$	$x_k^2 y_k$
Σ	90	1140	16200	245328	64	772	11120

Получаем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 10a + 90b + 1140c &= 64 \\ 90a + 1140b + 16200c &= 742 \\ 1140a + 16200b + 245328c &= 11120 \end{aligned} \right\}, \quad (46)$$

решение которой дает:

$$y_3 = 2,74 - 0,036x + 0,0350x^2.$$

График этой функции представлен на рис. 8.1.2. Чтобы судить о том, какое из двух полученных уравнений лучше аппроксимирует данную совокупность точек, нужно вычислить сумму квадратов невязок между истинным и полученными значениями ординат (см. табл. 8.1.6)

Таблица 8.1.6

Y	Прямая		Парабола	
	y_3	δ^2	y_3	δ^2
3	1,0	4,0	2,7	0,09
3	2,2	0,64	2,8	0,04
2	3,4	1,96	3,2	1,44
5	4,6	0,16	3,8	1,44
4	5,8	3,24	4,7	0,49
5	7,0	4,0	5,9	0,81
8	8,2	0,04	7,4	0,36
10	9,4	0,36	9,2	0,64
11	10,6	0,16	11,2	0,04
13	11,8	1,44	13,5	0,25
Σ	–	16,0	–	5,6

Из таблицы видим, что парабола дает сумму квадратов невязок в три раза меньшую, чем прямая и, следовательно, лучше аппроксимирует совокупность точек.

Сплайн-регрессия

Как было уже показано при интерполяции сплайнами, сплайн-функция проходит через каждую экспериментальную точку, причем точки совпадают с точками перегиба сплайн-функции. Если уменьшить число точек перегиба, то сплайн-функция не будет проходить точно через заданные точки. Дополнительное условие для построения сплайн-функции состоит в том, чтобы сумма квадратов отклонений заданных точек от аппроксимирующей функции была минимальной.

Задачи аппроксимации могут быть различными: интерполяция, наилучшее равномерное приближение, равномерное приближение с заданной точностью, наилучшее среднеквадратичное приближение. Выбор зависит от информации о функции и требований практики.

Приведем простейшую сплайн-функцию для аппроксимации измеренных данных.

Для каждого отрезка (x_i, x_{i+1}) изменения x кубическая сплайн-функция записывается в виде:

$$f_i(x) = \frac{1}{6h_i} \left[m_i(x_{i+1} - x)^3 + m_{i+1}(x - x_i)^3 \right] + \frac{1}{h_i} \left[\left(y_i - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) (x_{i+1} - x) + \left(y_{i+1} - \frac{m_{i+1} h_i^2}{6} \right) (x - x_i) \right],$$

где $h_i = x_{i+1} - x_i$; $f_i(x) = y(x)$; $m_i = f''(x_i)$ и $i = 1, 2, \dots; n$ (n – число узлов). При известных значениях x_i , y_i и m_i эта функция задает сплайн-аппроксимацию.

Если потребовать выполнения условия $f_i(x) = y_i$, то приведенное выражение для кубических полиномов-сплайнов приводит к системе линейных уравнений, из которых выводится m_i :

$$h_i m_i + 2(n_i + h_{i+1}) m_{i+1} + h_{i+1} m_{i+2} = 6 \left(\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right). \quad (47)$$

При условии $m_1 = 0$ и $m_n = 0$ получаются нормальные сплайн-функции.

Пример. Пусть необходимо провести сплайн-аппроксимацию для интеграла Френеля $S(x)$, заданного таблицей из 7 пар x_i и y_i .

Таблица 8.1.7

X_i	0	0,3	0,5	0,8	1	1,3	1,5
Y_i	0	0,299401	0,492344	0,722844	0,779893	0,638551	0,445261

Введем в программу расчета сплайн-аппроксимации значения N , x_i и y_i . Получим $m_1 = 0$, $m_2 = -0,8877862525$, $m_3 = -0,55472668737$, $m_4 = -2,019378004$, $m_5 = -3,563639669$, $m_6 = -1,902729099$, $m_7 = 0$.

8.1.4. Описание установки, методика проведения измерений и обработки результатов

1. Описание установки

Создание файла данных и проведение экспериментальных измерений проводится с помощью комплексной установки (рис. 8.1.3), включающей: источник излучения – бетатрон 1, ионизационную камеру 2, предварительный усилитель 3, дозиметрический прибор 4, аналогово-цифровой преобразователь 5, ЭВМ 6, цифроаналоговый преобразователь 7, подвижную платформу 8, видеоконтрольное устройство 9, ослабляющие пластины 10 и коллиматор 11.

Установка работает следующим образом. После настройки бетатрона 1 устанавливается образцовая пластина заданной толщины на пути пучка излучения. Излучение попадает на ионизационную камеру 2, установленную на платформе. Ионизационный ток с камеры 2 усиливается в предварительном усилителе 3 и затем попадает на дозиметр 4 со стрелочным прибором. Параллельно с выхода дозиметра сигнал в аналоговой форме поступает на АЦП 5 и затем на ЭВМ 6 для обработки. Движением платформы 8 управляют через ЭВМ 6 с помощью ЦАП 7.

Оцифрованные значения измеренного аналогового сигнала с ионизационной камеры, являющегося мерой мощности дозы бетатронного электронного излучения, составляют файл данных в памяти ЭВМ.

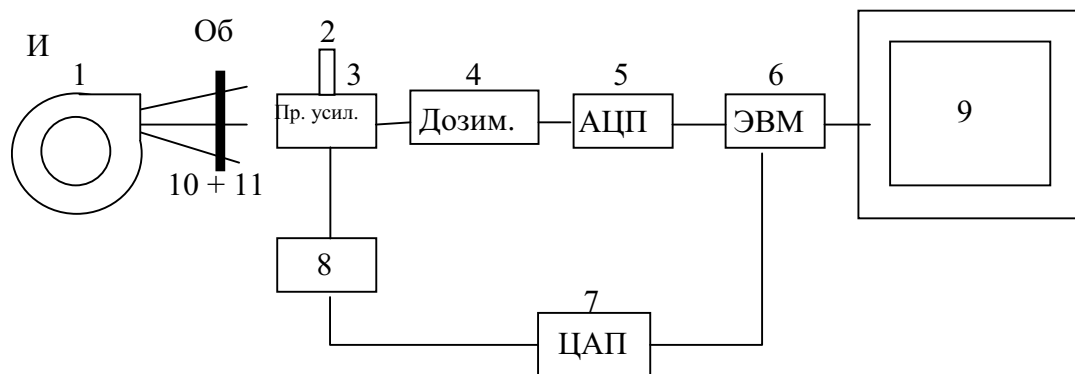


Рис. 8.1.3. Комплексная установка:

1 – источник излучения; 2 – ионизационная камера; 3 – предварительный усилитель; 4 – дозиметрический прибор; 5 – аналогово-цифровой преобразователь; 6 – ЭВМ; 7 – цифро-аналоговый преобразователь; 8 – подвижная платформа; 9 – видеоконтрольное устройство; 10 – ослабляющие пластины; 11 – коллиматор

2. Работа с дозиметром

Дозиметр VA-J-18 представляет собой радиометрический прибор, предназначенный для дозиметрических измерений. Прибор позволяет измерять как дозу, так и мощность дозы рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне значений независимо от энергии и на-

правления. В качестве детектора излучения применяются ионизационные камеры, предъявляющие как в энергетическом, так и в конструктивном отношении высокие требования к индикаторному прибору.

Перед включением нажать кнопку «НОЛЬ» выключателя «КОЭФФИЦИЕНТ F2».

Нажать выключатель «СЕТЬ». По истечении 2 минут дозиметр готов к проведению измерения. Привести выключатель F1 в положение I. При нажатой кнопке «НОЛЬ» вход дозиметра замкнут накоротко и можно провести коррекцию нулевой точки с помощью отвертки на регуляторе «N».

При проведении измерений следует учитывать, что кабель в небольшой степени тоже чувствителен к облучению. Этот эффект зависит от облученной длины кабеля и может составлять при облученной длине 10 см до 4 % измеренной дозы.

Значение измеряемой величины получают путем простого умножения трех коэффициентов и значения показывающей шкалы:

$$F_k \times F1 \times F2 \times F_{шк} = P \text{ [Р/мин]}.$$

F_k – коэффициент камеры, для прутковой (наперстковой) = 3,33.

$F1$ – переключатель «КОЭФФИЦИЕНТ F1».

$F2$ – кнопочный выключатель «КОЭФФИЦИЕНТ F2».

$F_{шк}$ – показания стрелочного прибора VA-J-18.

Для прутковой камеры предельное значение диапазона измерения 3000 Р/мин или 3000 Р.

3. Методика проведения измерений и обработка результатов

Для получения экспериментальных исходных данных, используемых при обработке методами вычислительной математики, проведем измерение ослабления пучка электронного излучения при прохождении его через вещество. Напомним, что при прохождении через вещество β -частицы теряют свою энергию, взаимодействуя с атомами этого вещества. Ослабление излучения обусловлено совокупностью механизмов взаимодействия: упругим и неупругим рассеянием, ионизационными потерями (образованием пар ионов), возбуждением атомов вещества и соответственно образованием тормозного излучения. Закон изменения мощности экспозиционной дозы первичного узкого пучка γ -квантов описывается для параллельного монохроматического излучения уравнением:

$$P_n = P_0 e^{-\mu H},$$

где P_0 – мощность экспозиционной дозы в точке детектирования в отсутствие поглотителя, P_n – мощность экспозиционной дозы излучения, прошедшего слой вещества толщиной H , μ – линейный коэффициент ослабления [см^{-1}].

Однако следует заметить, что генерируемый бетатроном электронный пучок при прохождении через вещество и при взаимодействии с ним преобразуется, и при регистрации необходимо учитывать, что на детектор воздействует как электронное, так и тормозное излучение. Поэтому закон изменения мощности дозы в данном случае не может быть описан как закон изменения мощности дозы для параллельного монохроматического излучения, а должен иметь вид как для немонотонного излучения и учитывать вклад как электронного, так и тормозного излучения, т. е.:

$$P_H = P_1 e^{-\mu_1 H} + P_2 e^{-\mu_2 H}, \quad (49)$$

где H – толщина слоя вещества; μ_1 и μ_2 – коэффициенты ослабления составляющих излучения; P_i – мощность экспозиционной дозы каждого излучения, прошедшего слой вещества.

Для получения данной зависимости экспериментально и определения коэффициентов ослабления и вклада составляющих излучения, перед пучком ставятся пластины различной толщины, наращивая ее до необходимого значения.

Измеренные значения мощности дозы P_i для каждой толщины H_i и составят данные для программы «MathCAD». С помощью этой программы производим аппроксимацию либо кубической сплайн-функции, либо функции, выбранной для аппроксимации. В нашем случае это – уравнение (49). Полученные аппроксимированные данные мощности дозы используем для вычисления коэффициента ослабления μ для заданного материала и энергии. В эксперименте используем материалы: медь, алюминий, железо, свинец и т. д.

Перепишем уравнение (49) в виде функции, зависящей от параметров μ_1 , μ_2 , P_1 и P_2 :

$$y_i = F(x, \mu_1, \mu_2, P_1, P_2), \quad (50)$$

у которой параметры μ_1 , μ_2 , P_1 и P_2 неизвестны. Полученные экспериментальные значения составляют некоторую функцию $y_i = f(x_i)$, где $i = 1; \dots n$ – число измеренных значений. Исходя из уравнения (50) и экспериментальных данных, необходимо определить значения параметров $\mu_{1,2}$ и $P_{1,2}$ таким образом, чтобы сумма S имела наименьшее значение:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, \mu_{1,2}, P_{1,2})]^2 \rightarrow \min. \quad (51)$$

Для практического использования запишем эту сумму следующим образом:

$$f(\mu_1, \mu_2, P_1, P_2) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[y_i - (P_1 e^{-\mu_1 x_i} + P_2 e^{-\mu_2 x_i}) \right]^2. \quad (52)$$

Это уравнение решаем в программе «MathCAD». Сначала вводим экспериментальные точки x_i и y_i , затем задаем искомым коэффициентам какие-либо начальные значения, например, $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 1$, $P_1 = 1$, $P_2 = 1$. После ввода уравнения (52) определяем, что все параметры больше 0 и решаем это уравнение. Полученные данные вставляем в уравнение (49) и для значений x_i находим аппроксимированную кривую (функция $y = f(x_i)$).

Пример

Выбираем теоретическую аппроксимирующую функцию

$$f(x) := de^{-ax} + ce^{-bx}.$$

Задаем $i: = 0 \dots 6$, $n: = 7$.

Вводим экспериментальные значения x_i и y_i .

Задаем $a: = 1$, $b: = 1$, $c: = 1$, $d: = 1$.

Вводим уравнение $f(a, b, c, d) := \sum_{i=0}^{n-1} \left[y_i - (de^{-ax} + ce^{-bx}) \right]^2$.

Given

Задаем начальные значения: $a > 0$ $b > 0$ $c > 0$ $d > 0$

Решаем: $p := \text{Minimize}(f, a, b, c, d)$

Получаем $p = \begin{pmatrix} 0,993 \\ 11,512 \\ 27,145 \\ 6,79 \end{pmatrix}$.

Присваиваем $a: = p_0$ $b: = p_1$ $c: = p_2$ $d: = p_3$

Задаем шаг $x_i: = 0; 0,01 \dots 3$.

Решаем функцию $f(x): = de^{-ax} + ce^{-bx}$.

8.1.5. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием установки.
2. Включить измерительную аппаратуру для прогрева в течение 5 мин.
3. Включить тумблер «СЕТЬ» пульта управления бетатрона.
4. Через 3 мин включить тумблер «МАГНИТ», при этом должен заработать силовой контур и электромагнит бетатрона.
5. Через 10 с включить тумблер «ИНЖЕКЦИЯ» и установить по микроамперметру ток инжекции 43 мкА с помощью плавной настройки на пульте управления.
6. Установить переключатель «ЭНЕРГИЯ» на нужное значение энергии в МэВ (1...6 МэВ).

7. Произвести настройку бетатрона с помощью ручек «КОНТРАКТОР» и «МОЩНОСТЬ ДОЗЫ» на максимальное значение мощности дозы излучения.
8. Выключить в обратном порядке бетатрон.
9. Установить мишень (ослабляющую излучение пластину) заданной толщины на пути пучка излучения.
10. Включить тумблер «МАГНИТ» на пульте управления.
11. Включить тумблер «ИНЖЕКЦИЯ» и установить ток 43 мкА.
12. Произвести измерение мощности дозы.
13. Выключить тумблер «ИНЖЕКЦИЯ», а затем «МАГНИТ».
14. Измеренное значение мощности дозы и толщину пластины ввести в ЭВМ в открытый файл.
15. Повторить пп. 8–14 N раз.
16. По окончании измерений выключить бетатрон.
17. На ЭВМ запустить программу «Линейное сглаживание по трем и пяти точкам».
18. Нажать клавиши «k» и «l» для сглаживания по трем и пяти точкам соответственно.
19. Распечатать графики обеих функций $P = f(H)$ совместно с графиками измеренной функции.
20. Сравнить полученные графики сглаживания.
21. На ЭВМ запустить программу Spline.bas для аппроксимации сплайном и экспоненциальной функцией.
22. По запросу ввести имя файла данных.
23. Ввести весовой коэффициент суммы квадратов отклонений pp . ($0 < pp < 1$).
24. Нажать клавишу Enter и получить результаты вычислений.
25. После завершения счета вторичным нажатием Enter вывести на экран полученный график аппроксимирующих функций.
26. Повторить пп. 23–25 для различных значений весового коэффициента pp .
27. Распечатать для выбранного значения коэффициента pp график функции $P = f(H)$ (мощности дозы от толщины ослабляющих пластин) и значение коэффициента ослабления для материала этих пластин.
28. Оценить погрешность аппроксимации сплайном и экспоненциальной функцией.
29. Сравнить полученные значения коэффициентов ослабления с табличным значением для заданного материала.
30. Сделать выводы по полученным результатам.
31. Оформить отчет о проделанной работе.

8.1.6. Содержание отчета

1. Краткое описание метода наименьших квадратов (простейший случай).
2. Блок-схема экспериментальной установки.
3. Таблица полученных данных.
4. График аппроксимирующей функции, значения ее параметров.
5. Выводы по работе.

8.1.7. Контрольные вопросы

1. Приведите пример преобразования нелинейной регрессии к линейной.
2. Какие условия служат критерием точности или достаточно хорошего приближения функциональной (аналитической) зависимости и табличной зависимости?
3. Может ли прямая регрессии проходить через начало координат и в каком случае?
4. Зачем применяются методы сглаживания экспериментальных данных?

Список использованных источников

1. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
2. Браунли К. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 408 с.
3. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
4. Эберги Х., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
5. Калиткин Н.И. Численные методы. – М.: Наука, 1978.
6. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учебное пособие для вузов. – М.: Наука, 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ.....	5
1.1. Определение линейного коэффициента ослабления фотонного излучения в железе, свинце и алюминии и приближенная оценка энергии фотонов	5
1.1.1. Цель работы	5
1.1.2. Краткое описание теории	5
1.1.3. Описание экспериментальной установки	8
1.1.4. Радиометр Б-4	9
1.1.4.1. Описание установки	9
1.1.4.2. Инструкция по эксплуатации	9
1.1.5. Меры безопасности	9
1.1.6. Задание	10
1.1.7. Методические указания по выполнению работы.....	12
1.1.8. Контрольные вопросы	13
1.1.9. Содержание отчета.....	13
1.2. Законы ослабления потоков ионизирующего излучения	14
1.2.1. Цель работы	14
1.2.2. Перечень приборов и оборудования, используемых в лабораторной работе	14
1.2.3. Программа проведения лабораторной работы	14
1.2.4. Законы ослабления пучков излучения	14
1.2.5. Определение длины свободного пробега гамма-квантов в зависимости от энергии излучения, плотности и порядкового номера элемента вещества.....	29
1.2.6. Порядок выполнения работы	30
1.2.7. Определение энергии электронов по величине пробега в веществе. Определение экстраполированного пробега в различных материалах	30
1.2.8. Определение энергии альфа-частиц по величине пробега в воздухе и алюминии.....	31
1.2.9. Контрольные вопросы	32
1.2.10. Содержание отчета.....	32
ГЛАВА 2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	33
2.1. Изучение рентгеновских аппаратов типа МИРА-2Д, АРИНА-02	33
2.1.1. Цель работы	33
2.1.2. Приборы и материалы.....	33
2.1.3. Общие сведения.....	33
2.1.4. Устройство и работа аппарата	41
2.1.5. Импульсный рентгеновский аппарат МИРА-2Д.....	43
2.1.6. Контрольные вопросы	44
2.1.7. Содержание отчета.....	44
2.2. Изучение работы бетатрона.....	45

2.2.1. Назначение	45
2.2.2. Состав	45
2.2.3. Технические данные	46
2.2.4. Устройство и работа бетатрона	46
2.2.5. Устройство и работа составных частей	50
2.2.6. Указание мер безопасности.....	56
2.2.7. Подготовка к работе и работа	58
2.2.8. Указания по просвечиванию	63
2.3. Индукционный ускоритель бетатрон	69
2.3.1. Цель работы	69
2.3.2. Теоретические сведения	69
2.3.3. Дозиметрический прибор	79
2.3.4. Порядок работы	81
2.4. Исследование поля излучения электронного пучка бетатрона при прохождении электронов через вещество	82
2.4.1. Цель работы	82
2.4.2. Задание	82
2.4.3. Теоретическая часть.....	83
2.4.4. Порядок выполнения работы	95
2.4.5. Обработка экспериментальных данных.....	96
2.4.6. Контрольные вопросы	97
2.5. Измерение активности источника ионизирующего излучения	97
2.5.1. Цели и задачи работы	97
2.5.2. Теоретические сведения	97
2.5.3. Измерение ионизирующего излучения.....	100
2.5.4. Порядок выполнения лабораторной работы	101
2.5.5. Вопросы к защите лабораторной работы.....	102
2.5.6. Содержание отчета по лабораторной работе.....	102
2.5.7. Графический материал	102
2.6. Испытание строительных материалов на содержание радионуклидов.....	103
2.6.1. Цели и задачи работы	103
2.6.2. Теоретические сведения	103
2.6.3. Порядок выполнения лабораторной работы	110
2.6.4. Вопросы к защите лабораторной работы.....	113
2.6.5. Содержание отчета по лабораторной работе.....	113
2.6.6. Графический материал	114
2.7. Изучение рентгеновского аппарата рап-160	114
2.7.1. Цель работы	114
2.7.2. Общие сведения.....	114
2.7.3. Технические характеристики	115
2.7.4. Состав изделия аппарата	117
2.7.5. Принцип работы и устройство аппарата.....	117
2.7.6. Порядок установки.....	123
2.7.7. Подготовка аппарата к работе	123
2.7.8. Порядок и правила работы	124

2.7.9. Указание мер безопасности.....	126
2.7.10. Техническое обслуживание.....	126
2.7.11. Правила транспортирования и хранения	127
2.7.12. Контрольные вопросы	127
Глава 3. ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	128
3.1. Измерение рабочей характеристики счетчика Гейгера–Мюллера.....	128
3.1.1. Цель работы	128
3.1.2. Приборы и оборудование	128
3.1.3. Общие сведения.....	128
3.1.4. Порядок выполнения работы	131
3.1.5. Содержание отчета.....	131
3.1.6. Контрольные вопросы	131
3.2. Измерение характеристики сцинтилляционного гамма-счетчика.....	132
3.2.1. Цель работы	132
3.2.2. Общие сведения.....	132
3.2.3. Порядок выполнения работы	138
3.2.4. Принадлежности.....	140
3.2.5. Содержание отчета.....	140
3.2.6. Контрольные вопросы	140
3.3. Измерение векторной диаграммы чувствительности газонаполненного гамма-счетчика в зависимости от направления потока гамма-квантов	141
3.3.1. Цель работы	141
3.3.2. Общие сведения.....	141
3.3.3. Эффективность счетчика.....	142
3.3.4. Порядок работы.....	143
3.3.5. Содержание отчета.....	143
3.3.6. Контрольные вопросы	143
3.4. Определение коэффициента использования гамма-излучения и эффективности газонаполненных счетчиков	144
3.4.1. Цель работы	144
3.4.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда	144
3.4.3. Счетчик Гейгера–Мюллера	147
3.4.4. Общие сведения.....	157
3.4.5. Порядок проведения работы	158
3.4.6. Список оборудования	158
3.4.7. Содержание отчета.....	158
3.4.8. Контрольные вопросы	159
3.5. Детекторы излучений для дозиметрии.....	159
3.5.1. Цель работы	159
3.5.2. Задание	159
3.5.3. Теоретическая часть.....	159
3.5.4. Описание установки и методика эксперимента.....	180
3.5.5. Порядок выполнения работы	182
3.5.6. Обработка результатов измерений	184

3.5.7. Содержание отчета.....	185
3.5.8. Дополнительные вопросы	185
Глава 4. СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ	186
4.1. Определение энергии гамма-излучения с помощью сцинтилляционного спектрометра	186
4.1.1. Многоканальный амплитудный анализатор.....	187
4.1.2. Дискриминаторы	189
4.1.3. Интегральный дискриминатор.....	189
4.1.4. Принцип работы многоканального амплитудного анализатора.....	191
4.1.5. Анализатор импульсов АИ-128- 2	204
4.1.6. Подготовка прибора к работе.....	204
4.1.7. Меры безопасности при работе с прибором.....	206
4.1.8. Порядок выполнения работы	206
4.1.9. Контрольные вопросы	206
4.1.10. Содержание отчета.....	207
Глава 5. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ	208
5.1. Исследование параметров интроскопа с газоразрядным люминесцентным преобразователем	208
5.1.1. Цель работы	208
5.1.2. Теоретическая часть.....	208
5.1.3. Меры безопасности	220
5.1.4. Задание	220
5.1.5. Контрольные вопросы	221
5.1.6. Содержание отчета.....	221
5.2. Исследование радиационного плотномера со счетчиком Гейгера–Мюллера	222
5.2.1. Цель работы	222
5.2.2. Теоретические сведения	222
5.2.3. Общие сведения о толщиномерах	224
5.2.4. Описание прибора-радиометра.....	227
5.2.5. Принцип работы счетчика.....	229
5.2.6. Порядок работы	232
5.2.7. Дополнительные указания.....	233
5.2.8. Содержание отчета.....	233
5.2.9. Контрольные вопросы	233
Глава 6. РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ	234
6.1. Измерение параметров рентгеновских изображений с помощью микрофотометра ИФО-451	234
6.1.1. Цель работы	234
6.1.2. Назначение прибора ИФО-451	234
6.1.3. Основные технические характеристики	234
6.1.4. Устройство микрофотометра ИФО-451	235
6.1.5. Правила эксплуатации микрофотометра ИФО-451	236
6.1.6. Связь оптической плотности почернения с параметрами излучения	242

6.1.7. Методы определения нерезкости изображения по микрофотограмме нерезкого края	243
6.1.8. Задание	243
6.1.9. Содержание отчета	243
6.1.10. Контрольные вопросы	244
6.2. Изучение телевизионной установки УАР-2 для анализа рентгенограмм	244
6.2.1. Цель	244
6.2.2. Назначение	244
6.2.3. Технические данные	244
6.2.4. Описание структурной схемы устройства установки УАР-2	245
6.2.5. Описание конструкции	247
6.2.6. Указание мер безопасности	248
6.2.7. Подготовка к работе	248
6.2.8. Порядок выполнения работы	250
6.2.9. Задание	257
6.2.10. Содержание отчета	257
6.2.11. Контрольные вопросы	258
6.3. Индивидуальный дозиметрический контроль методом ИФКУ	258
6.3.1. Цель работы	258
6.3.2. Введение	258
6.3.3. Краткое описание теории	259
6.3.4. Описание экспериментальной установки	260
6.3.5. Меры безопасности	265
6.3.6. Порядок работы	265
6.3.7. Методические указания по выполнению работы	265
6.3.8. Содержание отчета	266
6.3.9. Контрольные вопросы	266
6.4. Изучение счетно-пусковой установки СПУ 1-1М и измерение плотности потока нейтронов	267
6.4.1. Цель работы	267
6.4.2. Назначение	267
6.4.3. Технические данные	267
6.4.4. Принцип работы установки	269
6.4.5. Подготовка прибора к работе	272
6.4.6. Порядок работы	273
6.4.7. Настройка	275
6.4.8. Содержание отчета	277
6.4.9. Контрольные вопросы	277
Глава 7. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРИБОРЫ ДОЗИМЕТРИИ	278
7.1. Изучение дозиметра «Белла»	278
7.1.1. Цель работы	278
7.1.2. Общие сведения	278
7.1.3. Назначение	283

7.1.4. Технические характеристики	284
7.1.5. Краткое описание дозиметра	284
7.1.6. Подготовка дозиметра к работе	285
7.1.7. Порядок работы с дозиметром.....	285
7.1.8. Требования безопасности.....	287
7.1.9. Содержание отчета по лабораторной работе.....	287
7.1.10. Контрольные вопросы	287
7.2. Изучение дозиметра ДБГ-06Т и измерение мощности эквивалентной и экспозиционной дозы	288
7.2.1. Цель работы	288
7.2.2. Назначение	288
7.2.3. Технические характеристики	288
7.2.4. Устройство и принцип работы.....	289
7.2.5. Принцип работы дозиметра	291
7.2.6. Подготовка к работе.....	293
7.2.7. Порядок работы	294
7.2.8. Содержание отчета.....	294
7.2.9. Контрольные вопросы	295
7.3. Изучение клинического дозиметра 27012 и его калибровка.....	295
7.3.1. Цель работы	295
7.3.2. Общие сведения.....	295
7.3.3. Принцип работы прибора	297
7.3.4. Эксплуатация прибора	297
7.3.5. Проведение измерений	299
7.3.6. Содержание отчета.....	299
7.3.7. Контрольные вопросы	299
7.4. Техника безопасности и защита от ионизирующих излучений с помощью лабиринтов.....	300
7.4.1. Цель работы	300
7.4.2. Прохождение излучения через неоднородности в защите	300
7.4.3. Расчет лабиринтной защиты	302
7.4.4. Описание установки и методика измерений	308
7.4.5. Работа с дозиметром	308
7.4.6. Методика измерений.....	309
7.4.7. Порядок выполнения измерений	310
7.4.8. Обработка результатов	310
7.4.9. Контрольные вопросы	311
7.5. Техника безопасности и защита от ионизирующих излучений при работе на ускорителях электронов.....	311
7.5.1. Цель работы	311
7.5.2. Факторы опасности при работе ускорителей.....	311
7.5.3. Организация работ с применением источников ионизирующих излучений	313
7.5.4. Организация работ при обслуживании установок, использующих напряжение выше 1000 В	316

7.5.5. Технические мероприятия по защите от ионизирующих излучений при работе на ускорителе электронов.....	317
7.5.6. Дозиметрическая аппаратура для контроля радиационной обстановки при работе ускорителя	319
7.5.7. Дозиметрический контроль в поле отраженного и рассеянного излучений в помещении с ускорителем и вне помещения	321
7.5.8. Порядок выполнения работы	321
7.5.9. Содержание отчета.....	322
7.6. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки Томской области	323
7.6.1. АСКРО ТО. Цели и задачи работы.....	323
7.6.2. Информация об АСКРО	323
7.6.3. Порядок выполнения лабораторной работы	332
7.6.4. Вопросы к защите лабораторной работы.....	332
7.6.5. Содержание отчета.....	332
Глава 8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	334
8.1. Обработка результатов радиационного эксперимента	334
8.1.1. Цель работы	334
8.1.2. Задание	334
8.1.3. Теоретическая часть.....	334
8.1.4. Описание установки, методика проведения измерений и обработки результатов.....	347
8.1.5. Порядок выполнения работы	350
8.1.6. Содержание отчета.....	352
8.1.7. Контрольные вопросы	352

Учебное издание

КУЛЕШОВ Валерий Константинович
СЕРТАКОВ Юрий Иванович
ЕФИМОВ Павел Васильевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОМУ КОНТРОЛЮ И ДИАГНОСТИКЕ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор
доктор технических наук, профессор В.К. Кулешов

Компьютерная верстка *В.П. Ефимов*

Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 10.12.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 20,94. Уч.-изд. л. 18,94.
Заказ 000-10. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, www.tpu.ru