Министерство науки и высшего образования РФ
Машиностроительный колледж
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 14.02.01 «Атомные электрические станции и установки»

г. Иваново 2018 г.

Составитель: Мечтаева М.Н.
Редактор: Дубова Л.В.

Предлагаемые методические указания предназначены для студентов специальности 14.02.01, проходящих лабораторный практикум по МДК 04.01. «Основы обеспечения ядерной безопасности» профессионального модуля ПМ.04 «Обеспечения ядерной безопасности».
В указаниях подробно изложена методика проведения трех лабораторных работ:
Лабораторная работа №1. «Радиационная безопасность и дозиметрия гамма излучения от источника Кобальт-60».
Лабораторная работа №2. «Определение поглощающей способности материалов и расчет защиты от гамма-излучения».
Лабораторная работа №3. «Измерение активности стронция-90 в пробе продуктов питания методом бета-радиометрии».

Утверждены цикловой методической комиссией технологических дисциплин и оборудования Машиностроительного колледжа ИГЭУ

Рецензент

кафедра атомных электрических станций ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа №1. «Радиационная безопасность и дозиметрия гамма-излучения от источника кобальт-60»…… 4
1.1. Подготовка к работе……. 4
1.2. Оценка радиационной безопасности при работе с источником……... 5
1.3. Снятие зависимости мощности дозы от расстояния.. 9
1.4. Расчет мощности дозы по активности источника….. 11
1.5. Требования к отчету по лабораторной работе №1…. 14
Контрольные вопросы к лабораторной работе №1…….... 14

Лабораторная работа №2. «Определение поглощающей способности материалов и расчет защиты от гамма-излучения»…… 16
2.1. Подготовка к работе…….. 16
2.2. Порядок выполнения эксперимента……... 17
2.3. Обработка результатов эксперимента……. 21
2.4. Требования к отчету по лабораторной работе №2…. 23
Контрольные вопросы к лабораторной работе №2…….... 24

Лабораторная работа №3. «Измерение активности стронция-90 в пробе продуктов питания методом бета-радиометрии»……... 25
3.1. Подготовка к работе…….. 25
3.2. Порядок выполнения измерений……. 27
3.3. Статистическая обработка результатов измерений... 31
3.4. Интерпретация результатов измерений…….. 34
3.5. Требования к отчету по лабораторной работе №3…. 35
Контрольные вопросы к лабораторной работе №3…….... 36

Библиографический список……. 37
Приложение…….. 39

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. «РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ДОЗИМЕТРИЯ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ИСТОЧНИКА КОБАЛЬТ-60»

1.1. Подготовка к работе

Цель работы

1. Оценка радиационной безопасности студентов и персонала лаборатории при работе с закрытым радионуклидным источником гамма-излучения.

2. Изучение закона ослабления гамма-излучения с расстоянием от источника.

3. Сверка показаний различных дозиметров с расчетом мощности дозы.

Применяемое оборудование и материалы

1. Закрытый радионуклидный источник гамма-излучения с изотопом $_{27}Co^{60}$ (кобальт-60), размещенный в защитном контейнере из свинца с толщиной стенки 10 см. Контейнер снабжен *коллиматором* (открывающийся канал, позволяющий получить ограниченный пучок γ-излучения).

2. Передвижная каретка и линейка с делениями для измерения расстояния от источника до измерительного датчика (детектора).

3. Дозиметры с детекторами, регистрирующими гамма-излучение.

Основные характеристики установки с источником гамма-излучения

Термин ***«закрытый радионуклидный источник»*** означает техническое изделие, *конструкция которого исключает распространение радиоактивных веществ* в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан. Гамма-источник кобальтовый ГИК-2-9 представляет собой герметичную капсулу из нержавеющей стали (цилиндр 10 х 10 мм), внутри которой находится радиоактивный изотоп Co-60. Полезный поток гамма-квантов свободно проникает через тонкие стенки капсулы (с незначительной фильтрацией). Для целей на-

стоящей работы источник можно считать точечным, изотропным и моноэнергетическим.

Для защиты от гамма-излучения источник ГИК-2-9 помещен в свинцовый контейнер с толщиной стенки x =10,5 см, в котором имеется сквозной коллимирующий канал, закрываемый свинцовой заглушкой. При удалении заглушки получают слегка расширяющийся рабочий пучок гамма-излучения, направленный в сторону от людей. В этом пучке производятся измерения мощности дозы на различных расстояниях от источника.

В отчет по работе с лабораторного плаката необходимо выписать:

- эскиз защитного контейнера с источником (в разрезе);
- энергию фотонов гамма-излучения кобальта ($E\gamma$ = 1,25 МэВ);
- период полураспада изотопа Co-60 ($T_{1/2}$ = 5,27 лет);
- начальную активность источника *Ao* (Бк) и дату аттестации источника;
- паспортную мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м $\dot{X}$ (мкР/ч);
- значение гамма – постоянной кобальта-60 Г (нГр $\cdot$ м^2 / (с $\cdot$ ГБк))

1.2. Оценка радиационной безопасности при работе с источником

Лица, пребывающие в лаборатории дозиметрии, приказом по вузу отнесены к категориям «персонал группы А» (преподаватели и сотрудники) и «персонал группы Б» (студенты). Допустимые пределы годовой эффективной дозы по НРБ-99 для них равны соответственно $ПД_А$= 20 мЗв и $ПД_Б$= 5 мЗв.

Для оценки радиационной безопасности следует оценить годовую эффективную дозу работника, отделив при этом техногенную составляющую от природной. Для таких измерений более всего подходит переносной цифровой дозиметр МКС–08, включенный в режим измерения мощности эквивалентной дозы $\dot{H}$ (мкЗв/ч). *Внимание:* для получения правильных показаний

прибор следует направлять детектором (тыльной стороной корпуса) к источнику излучения.

1. Обойдя с дозиметром помещение лаборатории, выполнить радиационную разведку, т.е. отыскать места с повышенным уровнем гамма-излучения. *Рекомендуется измерить МЭД на поверхности всех устройств, отмеченных знаками радиационной опасности* (контейнеры, сейфы, комплекты источников на других рабочих столах). Записать в отчет значения МЭД для 3 – 4 характерных точек с указанием их на плане помещения.

2. Определить среднее значение природного фона (мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_{ф}$) по точкам, находящимся на максимальном удалении от техногенных источников, а также, при возможности, за окном (в этом случае обратить внимание на разницу показаний за окном и внутри помещения).

3. Измерить среднее значение мощности эквивалентной дозы $\dot{H}_{р.м.}$ на рабочем месте, находящемся в максимальной близости к источнику, т.е. с наибольшим уровнем излучения. Коллимирующий канал источника должен быть открыт, т.е. создана наихудшая радиационная обстановка. Вычитанием найти техногенную составляющую мощности эквивалентной дозы:

$$\dot{H} = \dot{H}_{р.м.} - \dot{H}_{ф}$$

4. В тех же условиях рассчитать мощность эффективной дозы $\dot{E}$ на рабочем месте. Для этого нужно учесть неравномерность облучения органов и тканей тела вблизи от источника, т.е. измерить МЭД $\dot{H}_T$ для 13 органов и тканей, а затем помножить их на взвешивающие коэффициенты радиочувствительности W_T. В наших условиях достаточно ограничиться измерениями для четырех контрольных точек тела: 1 – голова, 2 – грудь, 3 – гонады, 4 – стопы, и принять для них укрупненные взвешивающие коэффициенты W_K (см. табл.1.1).

Для принятого положения тела на рабочем месте («сидя» или «стоя» по указанию преподавателя) выполнить измерения мощности эквивалентной дозы $\dot{H}_K$ в четырех контрольных точках. ***Вычесть из всех показаний средний природный фон*** $\dot{H}_{ф}$, определенный в п.2.

5. Рассчитать мощность эффективной дозы по формуле

$$\dot{E} = \sum\left(\dot{H}_K \cdot W_K\right), \qquad (1.1)$$

где к = 1…4 – номер контрольной точки тела, $\dot{H}_K$ – техногенная составляющая МЭД и W_K – взвешивающий коэффициент органов и тканей для каждой точки (табл.1.1).

Таблица 1.1. **К определению мощности эффективной дозы на рабочем месте**

Точка контроля К	ОРГАНЫ (ТКАНИ) Т	Взвешивающие коэф-ты		МЭД $\dot{H}_K$
		W_T (НРБ-99)	$W_K = \Sigma W_T$	
1. Голова	1.Щитовидная железа	0,05	0,10	
	2. «Остальное»	0,05		
2. Грудь	3.Красн. кост. мозг	0,12	0,51	
	4.Легкие	0,12		
	5.Желудок	0,12		
	6.Грудная железа	0,05		
	7.Печень	0,05		
	8.Пищевод	0,05		
3. Гонады	9.Гонады	0,20	0,37	
	10.Толстый кишечник	0,12		
	11.Мочевой пузырь	0,05		
4. Стопы	12.Кожа	0,01	0,02	
	13.Клетки костных поверхностей	0,01		
Контрольная сумма		*1,0*	*1,0*	–

Итого: $\dot{E} = \sum\left(\dot{H}_K \cdot W_K\right)$, _____ мкЗв/ч

Найти коэффициент неравномерности облучения, равный отношению эффективной дозы к показаниям одного дозиметра:

$$\alpha = \dot{E}/\dot{H}$$

и сделать вывод о том, целесообразно ли в данных условиях учитывать неравномерность облучения при определении эффективной дозы.

6. Считая, что студент находится на данном рабочем месте все 16 часов лабораторного практикума, определить максимально возможную эффективную дозу техногенного облучения

студента за текущий год:

$$E_{студ} = \dot{E} \cdot 16.$$

7. Из тех же соображений оценить максимально возможную годовую дозу персонала группы А, приняв стандартное время работы сотрудников 1700 ч:

$$E_{перс} = \dot{E} \cdot 1700.$$

7. Определить эффективную дозу от природного облучения за этот же календарный год (8760 ч), считая, что природное облучение воздействует на органы и ткани человека равномерно:

$$E_{ест} = \dot{H}_{ф} \cdot 8760.$$

Оценить возможный разброс дозы природного облучения, грубо приняв доверительный интервал по максимальному и минимальному значениям фона, измеренным в п.2.:

$$\Delta = \left(\dot{\text{H}}_{\text{макс}} - \dot{\text{H}}_{\text{мин}}\right) \cdot 8760,$$

где $\dot{H}_{макс}, \dot{H}_{мин}$ – значения фона. Представить значение годовой дозы природного облучения с учетом возможного разброса в форме $E_{ест} \pm \Delta/2$ мЗв.

8. Через эффективную дозу оценить дополнительный индивидуальный пожизненный риск возникновения беспороговых эффектов у студентов и сотрудников, 1/(чел. .год) , связанный с принятыми условиями работы:

$$r = E_{студ,\ перс} \cdot r_E ,$$

где рисковый коэффициент принять равным $r_E = 5{,}6 \cdot 10^{-2}$ 1/(чел.Зв).

9. Сделать выводы о радиационной безопасности в лаборатории, для чего сопоставить годовые дозы техногенного облучения сотрудников и студентов с соответствующими пределами доз $ПД_А$ и $ПД_Б$. Вычислить кратность запаса до дозовых пределов.

Сопоставить дозы техногенного облучения сотрудников и студентов с ожидаемой годовой дозой от природного облучения и с ее разбросом.

1.3. Снятие зависимости мощности дозы от расстояния

В этой части работы необходимо снять зависимость мощности дозы от расстояния до источника поочередно тремя различными дозиметрами в условиях открытого и закрытого коллиматора на контейнере с источником.

При открытом коллиматоре детектор, находящийся в пучке гамма-излучения, «видит» непосредственно точечный источник и регистрирует его прямое излучение. Поглощением и рассеянием в воздухе на малых расстояниях можно пренебречь, поэтому в данном случае выполняется *закон обратных квадратов*: интенсивность излучения в вакууме обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного изотропного источника, например:

$$\dot{D}_1/\dot{D}_2 = r_2/r_1$$

При закрытом коллиматоре детектор регистрирует излучение, значительно ослабленное (в 300 и более раз) и рассеянное в свинцовой защите. Источником рассеянного излучения является вся поверхность контейнера, следовательно, источник уже нельзя считать точечным и закон обратных квадратов может выполняться лишь на больших расстояниях от него.

Для проведения измерений детектор выбранного дозиметра устанавливается на каретку, которая перемещается вдоль линейки с сантиметровыми делениями. Рекомендуется начать с дальнего расстояния (r =150 см), а затем, постепенно приближая детектор к источнику, найти границу, в которой прибор не «зашкаливает». В выбранном диапазоне снять 4–5 показаний мощности дозы на различных расстояниях ***и вычесть из них фон***. Значения расстояний и мощностей доз записать в журнал наблюдений (табл.1.2). В журнале следует выполнить перевод по-

казаний дозиметров в единицы МЭД (мкЗв/ч), если прибор отградуирован в других единицах.

Измерения следует повторить несколькими приборами при открытом и закрытом коллиматоре. При этом учесть, что из-за различной чувствительности дозиметров одни из них могут «зашкаливать» в открытом пучке, а другие ничего не показывать при закрытом. Прибор УИМ-2-2, отградуированный в единицах $с^{-1}$, измеряет поток фотонов через детектор (F) и называется *радиометром*. Для перевода его показаний в единицы мощности дозы следует использовать градуировочные зависимости, находящиеся на рабочем столе.

Результаты измерений зависимости МЭД от расстояния **следует представить на двух графиках** (один для открытого, другой для закрытого коллиматора). На каждый их них наносятся по 3 кривых, сглаживающих опытные точки.

Таблица 1.2. **Журнал измерений мощности эквивалентной дозы**

Тип прибора	Единица измерения	Расстояние r, см			
		30	50	100	150
Коллиматор открыт					
МКС–01–Р	мкЗв/ч *				
МКС–08–П	мкЗв/ч *				
УИМ-2-2	$с^{-1}$				
	Р/ч				
	мкЗв/ч *				
Коллиматор закрыт					
МКС–01–Р	мкЗв/ч *				
МКС–08–П	мкЗв/ч *				
СРП–68	мкР/ч				
	мкЗв/ч *				

Примечание: из показаний, отмеченных *, следует вычесть природный фон.

1.4. Расчет мощности дозы по активности источника

Расчеты мощности дозы удобно выполнять по форме табл. 1.3.

Таблица 1.3. **Журнал для расчетов мощности дозы**

1	Расстояние r, м	0,3	0,5	1,0	1,5
1	***Коллиматор открыт.*** Изотоп:_____ Г=_____ Активность А=_____ на дату работы				
2	Незащищенный источник, без учета ослабления в воздухе: Мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_0$, мкЗв/ч				
Линейный коэффициент ослабления воздуха μ_B = _____ $см^{-1}$					
3	Произведение $\mu_B x_B$ (x_B = r)				
4	Фактор накопления воздуха B_∞ ($\mu_B x_B$)				
5	Кратность ослабления воздуха К= exp ($\mu_B x_B$) / B_∞				
6	Незащищенный источник, с учетом ослабления в воздухе: мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_1 = \dot{H}_0/K$				
7	***Коллиматор закрыт.*** Толщина свинцовой защиты x_{Pb} = 10,5 см				
Линейный коэффициент ослабления свинца μ_{Pb} =_____ $см^{-1}$					
Поправка к фактору накопления на барьерную геометрию δ =_____					
Фактор накопления свинцовой защиты $B_{Pb}(\mu x)_{Pb}$ = _____					
Кратность ослабления свинца $K_{Pb} = \exp(\mu x)_{Pb}/B_{Pb} \cdot \delta$ = _____ раз					
8	МЭД с учетом ослабления в свинце: $\dot{H}_2 = \dot{H}_1 \cdot \exp(-\mu x)_{Pb} \cdot B_{Pb} \cdot \delta = \dot{H}_1/K_{Pb}$				

Последовательность заполнения журнала наблюдения:

1. Пересчитать активность источника на дату эксперимента t по формуле

$$A = Ao / 2^n , \qquad (1.2)$$

где n – число периодов полураспада, прошедших с даты метрологической аттестации источника до даты проведения эксперимента: $n = (t - To) / T_{1/2}$

t – текущая дата эксперимента, To – дата аттестации, $T_{1/2}$ – период полураспада (n должно быть безразмерно); Ao – начальная активность источника по паспорту (данные взять с лабораторного плаката).

2. Пересчитать таким же образом на дату эксперимента паспортную мощность экспозиционной дозы $\dot{X}$ на расстоянии 1 м от источника, которая указана на лабораторном плакате на дату его аттестации. Перевести ее в единицы мощности эквивалентной дозы $\dot{H}$ (мкЗв/ч).

3. Рассчитать значения МЭД на различных расстояниях от источника, находящегося вне защитного контейнера – $\dot{H}_0(r)$, мкЗв/ч. Для расчетов используется закон обратных квадратов: мощность дозы от точечного изотропного источника прямо пропорциональна его активности и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него:

$$\dot{D} = \Gamma \cdot A/r^2, \text{ нГр/с} \qquad (1.3)$$

где $\dot{D}$ – мощность поглощенной дозы, нГр/с; Г – гамма-постоянная радионуклида, нГр·м^2/(с·ГБк); A – активность источника, ГБк; r – расстояние, м.

Для определения мощности эквивалентной дозы (мкЗв/ч) в формулу вводится взвешивающий коэффициент радиации W_R, равный для гамма-излучения единице, и пересчетный коэффициент 3,6 = 3600/1000:

$$\dot{H}_0(r) = \Gamma \cdot A/r^2 \cdot W_R \cdot 3{,}6, \text{ мкЗв/ч} . \qquad (1.4)$$

Расчеты по формуле (1.4) записать в строчку с номером 2 табл.1.3.

Для расстояния r =1 м сравнить значение МЭД с паспортным значением, которое получено в п.2.

4. Сделать поправку на ослабление гамма-излучения в воздухе. Толщину слоя воздуха принять равной расстоянию от ис-

точника до детектора, x = r. Кратность ослабления слоя воздуха толщиной x_B см составляет

$$K = exp\ (\mu_B x_B) / B_\infty ,$$

где μ_B – линейный коэффициент ослабления воздуха, зависящий от энергии гамма-квантов, $см^{-1}$; B_∞ – фактор накопления в бесконечной геометрии, учитывающий вклад рассеянного воздухом излучения (зависит от энергии гамма-квантов и от произведения μx). Эти величины принять по таблицам П.1 и П.3 для энергии гамма-излучения источника.

МЭД на разных расстояниях с учетом ослабления в воздухе $\dot{H}_1 = \dot{H}_0/K$ следует записать в 6-ю строчку табл.1.3.

5. Рассчитать значения МЭД на тех же расстояниях для случая, когда источник находится в закрытом свинцовом контейнере (геометрию свинцовой защиты можно считать барьерной). Кратность ослабления свинцовой защиты толщиной x_{Pb}= 10,5 см составляет

$$K_{Pb} = \exp\ (\mu x)_{\mathrm{Pb}}/\mathrm{B}_{\mathrm{Pb}} \cdot \delta ,$$

где μ_{Pb} – линейный коэффициент ослабления свинца, берется по энергии гамма-квантов (табл.П.1); B_{Pb} – фактор накопления свинца для бесконечной геометрии, принимаемый по табл.П.2, и δ – поправка на барьерную геометрию (зависит только от энергии гамма-квантов), принимаемая по табл.П.2. МЭД с учетом ослабления в свинце $\dot{H}_2 = \dot{H}_1/K_{Pb}$ следует записать в 8-ю строчку табл.1.3.

6. Результаты расчетов по табл.1.3 следует нанести на два соответствующих графика, полученных в результате измерения МЭД от расстояния: один график для случая незащищенного источника – $\dot{H}_1(r)$, другой для источника, помещенного в контейнер – $\dot{H}_2(r)$,. Для удобства сверки показаний дозиметров с расчетами на графиках следует показать опытные точки из табл.1.2.

7. В выводах по данной части работы следует:

- сформулировать закон ослабления излучения с увеличением расстояния от источника;

- продумать возможные причины отклонений показаний приборов от расчетных значений;
- оценить поглощающую способность воздуха;
- рекомендовать способы снижения годовой эффективной дозы при работе с техногенными источниками излучений.

1.5. Требования к отчету по лабораторной работе №1

Отчет по работе должен содержать:

1) название, цели работы, состав бригады, дату выполнения;

2) необходимые для расчетов данные с лабораторного плаката;

3) журналы наблюдений и результаты расчетов (табл. 1.1, 1.2, 1.3);

4) графики: для открытого и для закрытого коллиматора (на каждом графике изображается по три кривых, соответствующих показаниям трех приборов);

5) изложение действий по оценке радиационной безопасности и определению мощности дозы;

6) выводы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе №1

1. Эффекты действия ионизирующего излучения на организм человека.
2. Детерминированные эффекты радиации, механизм развития.
3. Стохастические эффекты радиации, механизм развития.
4. Прямое и косвенное воздействие излучения на биоткань.
5. Поглощенная и эквивалентная доза – определение, единицы измерения.
6. Эффективная доза, область применения.
7. Коллективная доза и коллективный ущерб.
8. Мощность дозы. Природный радиационный фон.
9. Цели радиационной безопасности и пути их достижения.
10. Принципы обеспечения радиационной безопасности.

11. Виды облучения человека, рассматриваемые в НРБ-99.

12. Основные пределы доз – определение и содержание понятия.

13. Допустимые уровни при внешнем техногенном облучении – связь с основными пределами доз.

14. Гамма-постоянная источника. Связь мощности дозы, создаваемой точечным изотропным источником γ-излучения, с активностью и расстоянием.

15. Закон ослабления излучения с расстоянием.

16. Закон ослабления излучения в веществе.

17. Назначение, принцип действия и основные характеристики применяемых в настоящей работе приборов. Возможные области применения данных приборов.

18. Принципы защиты от облучения временем, расстоянием и экранами.

19. Расчетное время облучения и допустимая мощность дозы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ»

2.1. Подготовка к работе

Цель работы

1. Изучение закона ослабления гамма-излучения в веществе.

2. Экспериментальное определение параметров, необходимых для расчета толщины защитных экранов – линейного коэффициента ослабления материала и фактора накопления барьерного экрана.

3. Сопоставление полученных результатов со справочными данными и оценка энергетического спектра излучения гамма-источника.

4. Расчет толщины защитного экрана по заданной кратности ослабления.

Применяемое оборудование и материалы

Лабораторная установка (рис. 2.1) содержит:

1) радионуклидный источник гамма-излучения с изотопом $_{27}Co^{60}$ (кобальт-60), размещенный в защитном контейнере из свинца с толщиной 10 см. Контейнер снабжен *коллиматором* (открывающийся канал, позволяющий получить ограниченный пучок γ-излучения);

2) набор пластин известной толщины из свинца, железа и алюминия, которые устанавливаются на пути пучка фотонов;

3) измерительную аппаратуру: детектор фотонов гамма-излучения, установленный на фиксированном расстоянии от источника, и пересчетное устройство, подсчитывающее количество электрических импульсов детектора за заданный интервал времени;

4) свинцовую коллимирующую диафрагму с небольшим отверстием, установленным соосно с коллиматором источника, позволяющую выделить узкий пучок первичного излучения, ослабленный после прохождения через вещество.

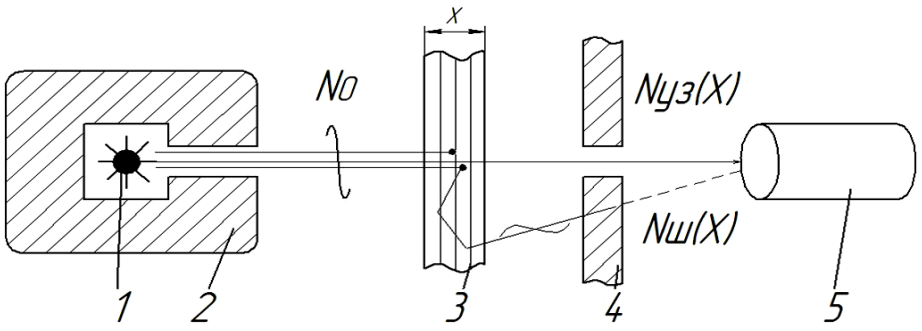

Рис. 2.1. Схема лабораторной установки:
1 – гамма-источник, 2 – защитный контейнер, 3 – набор пластин, 4 – диафрагма, 5 – детектор

Требования техники безопасности при эксперименте

1. Открытие и закрытие коллиматора свинцовой заглушкой следует производить дистанционирующим захватом либо рукой, без излишней спешки.

2. То же относится к установке пластин из исследуемых материалов поперек открытого пучка гамма-излучения.

3. При опускании или подъеме свинцовой диафрагмы следует соблюдать осторожность, избегать ударов и беречь руки.

4. Не следует намеренно подставлять руки и другие части тела под открытый пучок гамма-излучения.

5. По окончании эксперимента необходимо закрыть источник заглушкой, привести диафрагму в вертикальное положение и вымыть руки.

2.2. Порядок выполнения эксперимента

Экспериментальная часть работы сводится к измерениям интенсивности гамма-излучения в узком и широком пучке при наращивании толщины защитного материала. Суммарную толщину материала наращивают до тех пор, пока начальная интенсивность излучения не будет ослаблена в 2 раза и более.

Выполнение измерений. Пересчетное устройство снабжено клавишами ПУСК, СТОП, СБРОС, а также таймером, который отмеряет время счета импульсов. Время счета не должно быть слишком малым, иначе будет велика случайная погрешность отсчета, обусловленная стохастическим характером излучения. Рекомендуемое время каждого измерения – либо 2 раза

по 30 секунд с последующим усреднением результата, либо 100 секунд (один раз). Все измерения должны проводиться с одинаковым временем счета.

Перед каждым запуском пересчетного устройства нажимается клавиша СБРОС для обнуления показаний на табло. При нажатии клавиши ПУСК загорается световой индикатор, и на табло начинается счет. После гашения индикатора с табло можно снимать показание в виде числа импульсов N, которое прямо пропорционально интенсивности излучения.

Запись результатов ведется в журнал наблюдений (по форме табл.2.1.). В первую очередь в журнал следует записать принятое время измерений. Затем приступить к выполнению измерений в порядке, указанном ниже.

1. Измерить уровень естественного фона $N_ф$.

Фоновое гамма-излучение является помехой для эксперимента. Так как оно не постоянно во времени, то $N_ф$ следует измерить не менее 3 – 4 раз и затем усреднить, получив $N_{ф.ср}$. В дальнейшем это значение следует вычесть из каждого полученного результата.

При измерениях естественного фона детектор должен быть максимально экранирован от излучения источника. Заглушка коллиматора должна быть закрыта, диафрагма поднята в вертикальное положение, а на предметный столик коллиматора желательно установить дополнительно толстую защитную пластину из свинца. Детектор должен регистрировать только природный фон.

2. Измерить начальную интенсивность открытого пучка $N_{о.ср}$.

Опустив диафрагму, убрать с предметного столика свинцовую защитную пластину и удалить из коллиматора заглушку. Детектор будет регистрировать фон и начальное излучение источника при отсутствии на пути поглощающих материалов (толщина защиты x = 0).

Измерить 3–4 раза число $N_{о.ш}$ и занести в журнал наблюдений. Затем поднять диафрагму и измерить 3–4 раза $N_{о.уз}$. Все результаты следует усреднить вместе и записать в журнал среднее значение $N_{о.ср}$.

Таблица 2.1.**Форма журнала наблюдений к лабораторной работе**

Принятое время каждого измерения скорости счета: T= с

Фон :	$N_ф$ =					**$N_{ф.ср}$ =**	
Открытый пучок:	$N_{о.уз}$ =					$N_{о.ср}$ = (при x=0)	
	$N_{о.ш}$ =						
Число пластин	**Толщина** x, мм	Скорость счета с фоном		За вычетом фона		**Ln ($N_{уз}(x)$ / $N_{уз}(0)$)**	B(x) = $N_ш(x)$ / $N_{уз}(x)$
		$N_{уз+ф}(x)$	$N_{ш+ф}(x)$	$N_{уз}(x)$	$N_ш(x)$		
А. Материал поглотителя: свинец (Pb), ρ = 11,34 г/см^3, Z=82							
0	0,0					0	1
1							
2							
3 …							
Б. Материал поглотителя: железо (Fe), ρ = 7,89 г/см^3, Z=26							
0	0,0					0	1
1							
2							
3 …							
В. Материал поглотителя: алюминий (Al), ρ = 2,7 г/см^3, Z=13							
0	0,0					0	1
1							
2							
3 …							

Эксперимент выполнили: (Ф.И.О)

1._____

2._____ Дата:

3._____

4._____

Примечание: усреднять $N_{о.уз}$ и $N_{о.ш}$ вместе необходимо для того, чтобы учесть возможную несоосность отверстия диафрагмы с пучком излучения из коллиматора. Из-за этой неточности начальная интенсивность $N_{о.уз}$ немного меньше, чем $N_{о.ш}$, хотя при отсутствии пластин (x=0) они должны быть одинаковы (т.к. нерассеянный пучок всегда является узким).

Усредненное значение $N_{о.ср}$ следует записать в качестве начальных значений $N_{уз+ф}(0)$ и $N_{ш+ф}(0)$ во все строчки журнала наблюдений, где указано «Число пластин=0» и «Толщина x=0». Это значение одинаково для всех материалов, как в узком, так и в широком пучке.

3. Снять зависимость интенсивности узкого пучка от толщины материала $N_{уз+ф}(x)$. При поднятой диафрагме установить на предметный столик одну пластину из набора исследуемых материалов (например, свинец) и записать ее толщину в соответствующую колонку журнала наблюдений (толщина указана на пластине). Затем нажать клавиши СБРОС и ПУСК пересчетного устройства и измерить число импульсов $N_{уз+ф}(x)$ (оно обусловлено интенсивностью ослабленного узкого пучка и природным фоном). Записать результат в соответствующую колонку журнала.

Далее повторять эти измерения, каждый раз добавляя по одной пластине и записывая в графу «Толщина x» суммарную толщину всех установленных пластин. По мере наращивания пакета, в целях экономии времени, можно добавлять по две, по три и более пластины сразу, суммируя их толщину. Измерения заканчиваются, когда начальная интенсивность открытого пучка $N_{о,ср}$ (измеренная ранее) будет ослаблена несколько больше, чем в 2 раза.

4.Снять зависимость интенсивности в широком пучке $N_{ш+ф}(x)$.

Для измерений в широком пучке рекомендуется не убирать пакет пластин, набранный при измерениях узкого пучка. Осторожно опустить диафрагму и выполнять измерения в обратном порядке, последовательно удаляя пластины.

5. Повторить измерения по пп.3,4 для двух оставшихся материалов (железо и алюминий), таким образом полностью за-

полнив первые 4 колонки журнала наблюдений. По окончании работы убрать пластины с предметного столика, закрыть отверстие коллиматора заглушкой, установить на предметный столик толстую свинцовую пластину и поднять диафрагму.

2.3. Обработка результатов эксперимента

1. Заполнить остальные колонки журнала наблюдений:

1) вычесть из всех результатов наблюдений средний фон:

$$N_{уз}(x) = N_{уз+ф}(x) - N_{ф.ср}\ ;\ N_{ш}(x) = N_{ш+ф}(x) - N_{ф.ср}.$$

2) Рассчитать логарифм экспериментальной кратности ослабления в зависимости от толщины материала:

$$\mathbf{Ln\ (N_{уз}(x) / N_o) = - ln\ (К_{осл}(x)),}$$

где $N_o = N_{o.ср} - N_{ф.ср}$ – начальная интенсивность открытого пучка (при x=0) за вычетом фона. Значение логарифма отрицательно.

3) рассчитать для каждой толщины материала экспериментальное значение фактора накопления:

$$B(x) = N_{ш}(x) / N_{уз}(x).$$

Значение B(x) должно быть больше 1. Если отдельные наблюдаемые значения B<1, то это говорит не столько об ошибках измерений, сколько о стохастическом характере измеряемых величин – $N_{ш}(x)$, $N_{уз}(x)$. Опытные значения B(x) следует оставить такими, какие они есть, либо проверить сомнительные точки повторными измерениями.

2. По графику $\ln(N(x)/N_o)$ определить для каждого материала толщину слоя половинного ослабления $x_{1/2}$.

В узком пучке моноэнергетического излучения зависимость логарифма экспериментальной кратности ослабления $\ln(N(x)/N_o)$ от толщины пластин x *должна быть линейной*, что следует из закона ослабления:

$$\ln (N_{уз}(x) / N_o) = -\mu x, \qquad (2.1)$$

где μ представляет собой тангенс угла наклона прямой. Поэтому для повышения точности определения толщины половинного ослабления следует построить прямую 1 (см. рис.2.2), нанеся опытные точки из табл.2.1, и провести ручное сглаживание по линейке, включая точку $\ln(N(x)/N_o)=0$ при $x=0$.

Устранив таким образом разброс опытных точек, найти графически толщину слоя половинного ослабления $x_{1/2}$, при которой $N(x)=N_o/2$. Для этого следует отложить по оси ординат значение $\ln(1/2) = -0{,}693$ (рис.2.2).

В широком пучке кривая ослабления 2 нелинейна, т.к. она определяется законом ослабления, где множитель B зависит от толщины x. Очевидно, что толщина половинного ослабления в широком пучке $x_{1/2}^{ш}$ будет больше. Кривую 2 показывать не требуется.

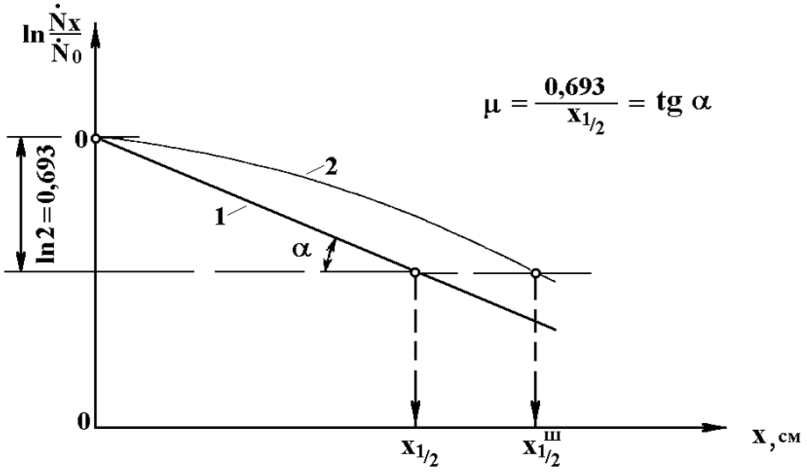

Рис. 2.2. Примерный вид кривых ослабления моноэнергетического излучения в веществе: 1 – в геометрии узкого пучка, 2 – в геометрии широкого пучка.

3. Определить линейные коэффициенты ослабления материалов.

Найдя толщину слоя половинного ослабления $x_{1/2}$ в узком пучке, как показано на рис.2.2, определить линейный коэффициент ослабления свинца:

$$\mu = 0{,}693 / x_{1/2},\ см^{-1} \qquad (2.2)$$

Аналогичным образом найти по толщине половинного ослабления значения μ для железа и алюминия. Сопоставить опытные значения для всех трех материалов со значениями,

приведенными в справочных таблицах (табл. П.1), записав их рядом в качестве вывода по работе.

4. Построить графики фактора накопления в зависимости от показателя ослабления экрана B(μx) **для всех трех материалов и сопоставить их со справочными данными.**

По оси абсцисс откладывается показатель ослабления защитного экрана (произведение μx), а по оси ординат фактор накопления B(μx). Для сопоставления с данными табл. П.3 ось абсцисс следует разбить на две области – для опытных и табличных значений.

В первой области значения μx, соответствующие условиям эксперимента, малы и значения B лишь немного больше 1 (толщина x берется из журнала наблюдений, μ – опытное). Здесь можно принять более крупный масштаб. Ввиду большого разброса точек, что объясняется случайным характером наблюдений $N_{ш}(x)$, $N_{уз}(x)$, их не следует соединять между собой. Изображается только область наблюдаемых (оценочных) значений B.

Во второй области откладываются значения B из табл. П.3 для выявления характера зависимости фактора накопления от толщины материала. Принимается более мелкий масштаб и диапазон значений μx от 1 до 4–10. По оси ординат откладывается барьерный фактор накопления, определяемый как произведение B∞ и поправки δ. Их следует принять по табл. П.3 и П.2.

В выводах следует отразить характер зависимости фактора накопления от толщины, вида вещества и энергии гамма-излучения, а также его влияние на кратность ослабления защитных экранов.

2.4. Требования к отчету по лабораторной работе №2

Отчет по работе должен содержать:

1) название, цели работы, состав бригады, дату выполнения;

2) блок-схему установки, схему измерений в узком и широком пучках;

3) журнал наблюдений и расчетов (табл. 2.1);

4) графики: кривые ослабления, фактор накопления от толщины защиты;

5) изложение действий по измерениям и определению $x_{1/2}$, μ, B;

6) сопоставление полученных результатов с табличными значениями и выводы о погрешностях измерений и расчетных методов.

Контрольные вопросы к лабораторной работе №2

1. Слой половинного ослабления $x_{1/2}$. Определение $x_{1/2}$ по графику.

2. Узкий и широкий пучок. Различие в механизмах ослабления.

3. Чем отличаются различные геометрии фактора накопления?

4. В каком пучке определяется линейный коэффициент ослабления?

5. Написать закон ослабления интенсивности излучения в геометрии широкого пучка и пояснить входящие в него параметры.

6. Что такое фактор накопления и от каких величин он зависит ?

7. Чем определяется погрешность определения линейного коэффициента ослабления μ ?

8. Как определить толщину защиты, зная фактор накопления ? Какие для этого существуют методы ?

9. Почему радионуклид Co-60 принято считать моноэнергетическим гамма-источником ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. «ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОСТИ СТРОНЦИЯ-90 В ПРОБЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ МЕТОДОМ БЕТА-РАДИОМЕТРИИ»

3.1. Подготовка к работе

Цель работы

1. Изучение абсолютного и относительного метода бета-радиометрии.

2. Измерение активности пробы пищевого продукта относительным методом.

3. Определение погрешности результата и оценка достоверности измерений.

4. Проверка условий радиационной безопасности при возможном поступлении радионуклидов в организм.

Применяемое оборудование и материалы

1. Бета-радиометр КРК-1-01А (либо другой), состоящий из блока детектирования бета-частиц и пересчетного устройства, в котором имеется таймер и стабилизированный блок питания (см. рис. 3.1). Техническое описание радиометра и инструкция по работе с ним имеются в лаборатории. В отчет следует записать тип и основные характеристики прибора.

2. Исследуемый образец – проба пищевого продукта, загрязненного радионуклидами ^{90}Sr + ^{90}Y (сушеные грибы, собранные в 1990 г. в районе радиоактивного следа Чернобыльской аварии). Масса пробы m = 8,6 г.

3. Эталонный стронций-иттриевый источник закрытого типа. Данные метрологической аттестации источника:

• тип: 1СО-133, заводской номер 510;

• начальная активность A_0 = 1340 Бк;

• дата метрологической аттестации: t_0 = 1.09.1989 г.

• период полураспада материнского нуклида ^{90}Sr: $T_{1/2}$ = 29 лет.

Примечание. Характеристики пробы и эталонного источника могут быть другими. Их следует сверить с фактическими данными, находящимися на рабочем столе, и записать в отчет.

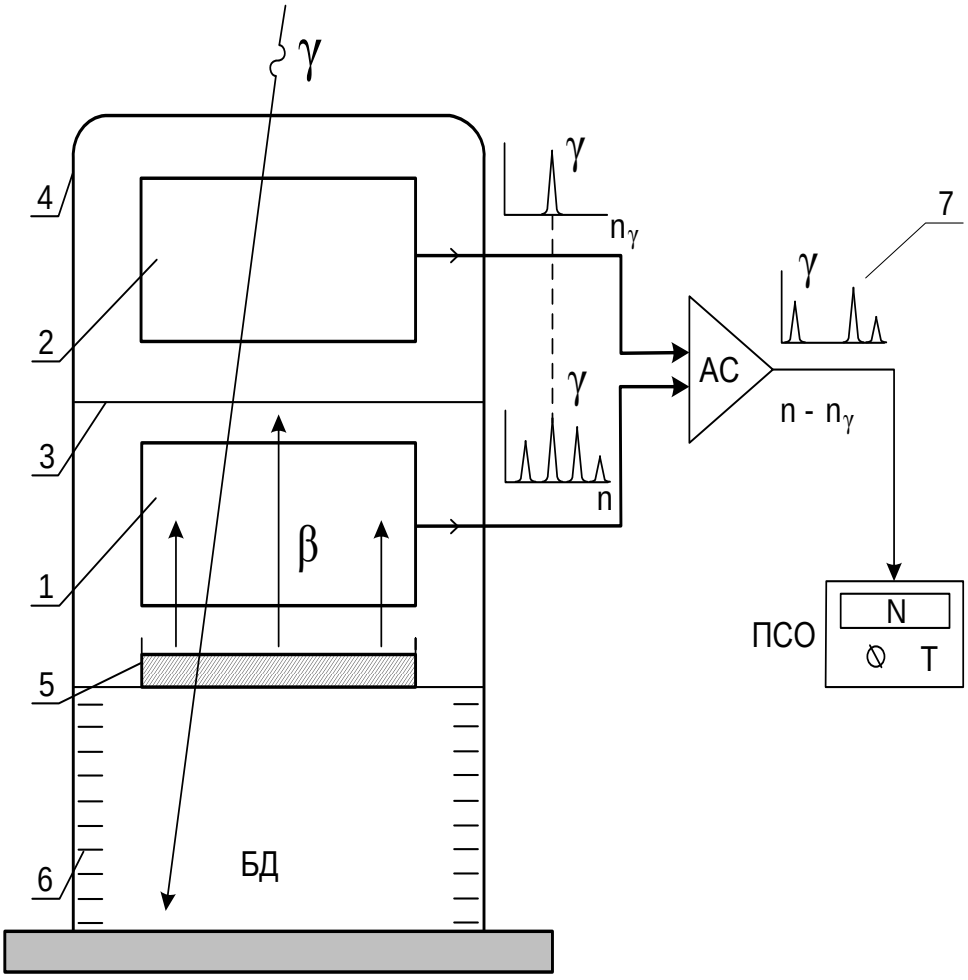

Рис. 3.1. Схема измерения активности на радиометре КРК-1-01А в геометрии плоского мононаправленного источника с компенсацией фона: БД – блок детектирования БДИБ-01А, АС – схема антисовпадений, ПСО – прибор счетный одноканальный (пересчетное устройство) УСЦ-01; Т – рукоятка установки таймера; N – число импульсов, отображаемое на табло. 1, 2 – два детектора; 3 – алюминиевый экран, поглощающий β-частицы; 4 – корпус блока детектирования; 5–плоский мононаправленный бета-источник; 6 – канавки для установки источника; 7 – осциллограмма сигнала.

Принцип компенсации помехи от фона в радиометре КРК-1-01А

Плоский мононаправленный бета-источник 5 (см. рис. 3.1) максимально приближен к детектору. Детектор 1 регистрирует бета-излучение от пробы и внешний гамма-фон (суммарная скорость счета n), а детектор 2 – только гамма-фон (n_γ). Схема антисовпадений АС дискриминирует гамма-фон, т.е. не пропус-

кает на выход импульсы, совпадающие по времени в обоих детекторах. В результате ПСО регистрирует только полезный сигнал от источника (разность $n - n_\gamma$). Фоновый сигнал детектора 2 вычитается из суммарного автоматически.

Требования безопасности при выполнении работы

1. Радиоактивные источники (эталонный источник и исследуемый образец) должны находиться только на рабочем столе – либо в коробке, либо внутри блока детектирования. Не допускается перемещать их на другие места и выносить из лаборатории.

2. Поток излучения от бета-источников направлен перпендикулярно излучающей поверхности, поэтому источники рекомендуется держать ребром к себе и не направлять излучение на глаза и на других людей.

3. По окончании использования эталонного источника его следует поместить в защитный футляр и завинтить крышку.

4. При работе с эталонным источником и пробой следует помнить, что разгерметизация их защитных оболочек может привести к радиоактивным загрязнениям. На оболочках пробы и эталонного источника не допускаются повреждения или царапины.

5. Для исключения возможности радиоактивных загрязнений одежды и кожных покровов следует использовать белые халаты. По окончании работы, а также при необходимости выйти из лаборатории следует тщательно вымыть руки с мылом.

3.2. Порядок выполнения измерений

Предварительные действия.

1. Ознакомиться с органами управления радиометра по его техническому описанию (на рабочем месте). Выяснить способ установки чашки с источником в блок детектирования.

Выписать в отчет данные пробы (наименование, массу, форму, размеры, агрегатное состояние) и паспортные данные эталонного источника (тип, заводской номер, изотоп, начальную активность и дату аттестации, период полураспада).

2. Рассчитать активность эталонного источника на дату эксперимента (см. лаб.раб. №2) и занести в отчет.

3. Приступить к измерениям. Экспериментальная часть работы включает в себя:

- проверку работоспособности прибора (выполняется по его техническому описанию);
- измерение средней скорости счета, обусловленной естественным гамма-фоном, для оценки минимальной достоверно измеряемой активности $A_{\min}$ и вычитания фона;
- калибровку радиометра по эталонному источнику для определения чувствительности прибора к активности радионуклида *P*;
- измерение средней скорости счета, обусловленной излучением пробы в условиях фона, для вычисления активности пробы $A_{пр}$.

Выполнение измерений.

Пересчетное устройство снабжено клавишами ПУСК, СТОП, СБРОС, а также таймером, который отмеряет время счета импульсов (экспозицию).

На радиометре КРК-1-01А время счета задается рукояткой переключателя, имеющей три положения: 10 с, 100 с и 1000 с. Время счета не должно быть слишком малым, иначе будет велика случайная погрешность отсчета, обусловленная стохастическим характером излучения. Рекомендуемое время для измерений фона и малой активности пробы T=100 с, а для сравнительно большой активности эталонного источника достаточна экспозиция T=10 с.

Перед каждым запуском пересчетного устройства нажимается клавиша СБРОС для обнуления показаний на табло. При нажатии клавиши ПУСК загорается световой индикатор, и на табло начинается счет. После гашения индикатора «СЧЕТ» с табло можно снимать показание в виде числа импульсов N, которое прямо пропорционально интенсивности излучения.

Внимание: в журнал наблюдений записываются не абсолютные показания прибора N, а скорость счета n, имп/с, которую находят делением показания на время экспозиции T, с :

$$n = N / T .$$

Значения скорости счета n, $с^{-1}$, – дробные и должны содержать 1–2 значащих цифры после запятой. Для нахождения средней скорости счета и оценки погрешности каждое измерение следует повторить до 10 (но не менее 5) раз.

Запись результатов можно вести в строчку в виде массива наблюдаемых значений, отделяя их друг от друга точкой с запятой. Выполняются три серии измерений – фон, эталон, проба.

1. Измерение скорости счета от внешнего гамма-фона – $n_ф$. Открыв створки блока детектирования, убедиться, что в нем не находится источников излучений, и установить в блок пустую чашку. Закрыть створки, установить время экспозиции T=100 с и выполнить 5–10 измерений, записав в отчет следующие значения:

Ряд наблюдений $n_ф$ = ____; ____; ____; ____; ____;
и т.д., $с^{-1}$

Количество измерений (длина ряда) m = ____

Среднее арифметическое скорости счета $\overline{n}_ф$ = ____, $с^{-1}$

Среднеквадратичное отклонение $\sigma_ф$ = ____, $с^{-1}$

Примечания.

1. Ряд наблюдений представляет собой выборку наблюдаемых значений случайной величины n. Однородность выборки следует оценивать визуально, вычеркивая из нее явно выпадающие значения (слишком большие или малые). Сомнительные значения проверяются повторными измерениями.

2. Среднеарифметическое значение (матожидание) скорости счета $\overline{n}_ф$ и ее среднеквадратичное отклонение $\sigma_ф$ рассчитываются по формулам (3.1) и (3.2) в процессе обработки результатов.

3. Если при первых трех измерениях фона радиометр дает отсчет N=0 или N=1 за 100 секунд, то это означает, что схема компенсации фона АС (рис.3.1) работает нормально. В таком случае дальнейшие измерения фона проводить не требуется, и для расчетов принимается $\overline{n}_ф = \sigma_ф = 0$.

2. Измерение скорости счета от эталонного источника – $n_{ЭТ}$. Извлечь эталонный источник из защитного футляра и поместить его в блок детектирования. Закрыть створки блока детектирования и установить на пересчетном устройстве время экспозиции T=10 с. Выполнить 5–10 измерений, записав следующие значения:

Ряд наблюдений $n_{эт}$ = ____; ____; ____; ____; ____;
и т.д., $с^{-1}$

Количество измерений m = ____

Среднее арифметическое скорости счета $\bar{n}_{ЭТ}$ = ____, $с^{-1}$

Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{ЭТ}$ = ____, $с^{-1}$

По окончании серии измерений следует убрать источник из блока детектирования и поместить его в защитный футляр.

3. Измерение скорости счета, обусловленной активностью пробы в условиях внешнего гамма-фона, – $n_{ПР}$. Поместить в блок детектирования чашку с исследуемым образцом, соблюдая такое же положение относительно детектора, что и при установке эталонного источника. Закрыв створки, установить время экспозиции T=100 с. Выполнить 5–10 измерений, записав следующие значения:

Ряд наблюдений $n_{ПР}$ = ____; ____; ____; ____; ____;
и т.д., $с^{-1}$

Количество измерений m = ____

Среднее арифметическое скорости счета $\bar{n}_{ПР}$ = ____, $с^{-1}$

Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{ПР}$ = ____, $с^{-1}$

По окончании измерений следует убрать из блока детектирования исследуемый образец и поместить его в коробку.

Оценив время, оставшееся до конца лабораторной работы, по возможности следует довести число измерений в каждой серии до 10. По окончании работы установить в блок детектирования пустую чашку и отключить бета-радиометр, оставив створки блока детектирования открытыми. Сдать коробку с источниками лаборанту.

3.3. Статистическая обработка результатов измерений

При измерениях малой активности, сопоставимой с уровнем естественного гамма-фона, очень велика роль случайной погрешности, обусловленной стохастическим характером излучения пробы и фона. Ее неучет может привести к недостоверным и даже абсурдным выводам. Методы статистической обработки результатов измерений подробно рассмотрены в [5].

Целью статистической обработки является ***определение доверительного интервала***, т.е. такого диапазона, в котором истинное значение измеряемой величины (активности) будет находиться с доверительной вероятностью, равной 0,95.

1. Первичная обработка рядов наблюдений. В каждой серии выполненных измерений необходимо вычислить среднеарифметическое значение скорости счета $\bar{\bar{n}}$, $с^{-1}$, усредненное за m наблюдений, а также среднеквадратичное отклонение (СКО) скорости счета от ее математического ожидания σ, $с^{-1}$, по формулам

$$\bar{n} = \Sigma n_i / m \ \ (i = 1 \ldots m), \tag{3.1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma \ \ n_i - \bar{n}^{\ 2}}{m-1}}. \tag{3.2}$$

Величина СКО (σ, $с^{-1}$) характеризует случайный разброс скорости счета за общее время наблюдения, равное T·m , где T – длина одной экспозиции.

2. Калибровка радиометра. Используя измеренную скорость счета от эталонного источника $\bar{n}_{ЭТ}$ за вычетом фоновой составляющей $\bar{n}_{ф}$, $с^{-1}$, и активность источника $A_{ЭТ}$, Бк, рассчитанную на дату эксперимента, определить чувствительность радиометра к радионуклиду *P*, $с^{-1}$/Бк :

$$P = \frac{\bar{n}_{ЭТ} - \bar{n}_{ф}}{A_{ЭТ}}, \tag{3.3}$$

а также найти СКО чувствительности σ_P, $с^{-1}$/Бк, и относительную погрешность калибровки δ, % :

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{\sigma_{ЭТ}^2 + \sigma_{ф}^2}}{A_{ЭТ}}; \quad \delta = (\sigma_P / P) \cdot 100\ \% . \qquad (3.4)$$

Калибровка считается хорошей, если погрешность за 10 наблюдений не превышает 1,5 %. Для лабораторной работы в условиях лимита времени допускается погрешность до 2,5 %, вычисленная за 3–5 наблюдений.

3. Оценка нижнего предела достоверных измерений. Значение минимальной достоверно измеряемой активности A_{min}, Бк, в условиях внешнего радиационного фона определяется разбросом $\sigma_ф$ фоновой скорости счета:

$$A_{min} = 2\sigma_ф / P . \qquad (3.5)$$

Это значение следует сравнить с паспортным диапазоном измеряемых активностей по техническому описанию радиометра.

4. Определение активности пробы. Значение общей (A, Бк) и удельной (A_m, Бк/кг) активности исследуемой пробы рассчитывается по формуле

$$A = \frac{\overline{n}_{ПР} - \overline{n}_{ф}}{qP}, \qquad (3.6)$$

где q = m – масса пробы, кг (или масса исходного продукта, из которого получена проба), либо q = 1 (для расчета общей активности); P – чувствительность радиометра к радионуклиду, определяемая по формуле (3.3).

5. Определение погрешности измерения активности. Величина доверительного интервала d при доверительной вероятности 0,95 и нормальном наблюдаемых значений составляет $1{,}96\sigma_A$, где σ_A (СКО измеренной активности), в свою очередь, определяется суммой дисперсий скоростей счета, обусловлен-

ных пробой с фоном ($\sigma_{ПР}^2$) и только фоном ($\sigma_ф^2$). Таким образом,

$$d = 1{,}96\frac{\sqrt{\sigma_{ПР}^2 + \sigma_ф^2}}{qP}, \qquad (3.7)$$

где q и P – то же, что и в формуле (3.6).

6. Выводы по результатам измерений. Окончательные результаты измерений должны быть представлены с указанием границ доверительных интервалов в следующем виде:

$\boldsymbol{A \pm d}$ – для общей активности пробы, Бк;

$\boldsymbol{A_m \pm d_m}$ – для удельной активности, Бк/кг,

где A, A_m – математическое ожидание, найденное по формуле (3.6); d, d_m – доверительный интервал, рассчитанный по формуле (3.7) соответственно при q=1 и при q , равном массе пробы.

Значение общей активности $A \pm d_A$ необходимо сравнить со значением нижнего предела достоверных измерений A_{min}, найденного по формуле (3.5). Сделать вывод о достоверности полученного результата.

7. Оценка минимально необходимого времени экспозиции, обеспечивающего допустимую основную погрешность.

Выполняется в том случае, если прибор не компенсирует внешний гамма-фон (т.е. $\bar{n}_ф \neq 0$).

• Минимально необходимое время экспозиции **для измерения фонового излучения** определяется по ранее принятой экспозиции (T=100 с) и полученной ранее средней скорости счета фона $\bar{n}_ф$:

$$T_ф = 1{,}96^2 \cdot \frac{T \cdot 10}{\bar{n}_ф}. \qquad (3.8)$$

• То же, **для измерения излучения пробы в условиях фона**:

$$T_{ПР} = 1{,}96^2 \cdot \frac{\bar{n}_{ПР} + \sqrt{\bar{n}_{ПР} \cdot \bar{n}_ф}}{\bar{n}_{ПР} - \bar{n}_ф{}^2}. \qquad (3.9)$$

Эти значения нужно сравнить с фактическим временем проведенных измерений фона и пробы, которое равно T·m (где m – количество экспозиций, T=100 с – длина одной экспозиции). Если суммарное время T·m не меньше, чем время, вычисленное по формулам (3.8) и (3.9), то **можно сделать вывод** о том, что допустимая основная погрешность при измерениях в условиях фона обеспечена.

3.4. Интерпретация результатов измерений

1. Выписать данные Норм радиационной безопасности для радионуклидов Sr-90 и Y-90, содержащихся в исследуемой пробе, из табл. П.4 (для поступления через ЖКТ):

• значения дозовых коэффициентов (ε);

• пределы годового поступления с рационом (ПГП);

• допустимую удельную активность в рационе (ДУА).

2. Вычислить раздельно активность стронция (A_S) и активность иттрия (A_Y) в пробе. Полный поток β-частиц при регистрации излучения обусловлен наличием двух радионуклидов и согласно формуле он равен

$$F_{4\pi} = A_S \cdot v_S + A_Y \cdot v_Y .= A \cdot (v_S + v_Y).$$

С учетом этого получается, что

$$A_S = A_Y = A/2 .$$

Здесь A – значение общей активности, полученное из опыта по формуле (3.6); v_S, v_Y – выходы β-частиц для стронция и иттрия, выраженные в относительных единицах.

3. Проверить условие радиационной безопасности для случая однократного употребления данного продукта в пищу. Однократное употребление допустимо, если не превышаются пределы годового поступления. Для двухфакторного внутреннего облучения при поступлении Sr-90 и Y-90 через ЖКТ принцип нормирования записывается в виде суммы

$$\frac{П_{S,РАЦ}}{ПГП_{S,РАЦ}} + \frac{П_{Y,РАЦ}}{ПГП_{Y,РАЦ}} \le 1 ,$$

где однократные поступления $П_{S,РАЦ}$ и $П_{Y,РАЦ}$ принимаются равными соответствующим активностям стронция и иттрия (A_S и A_Y) в пробе с данной массой (m =8,6 г).

Сделать вывод о допустимости однократного употребления загрязненного продукта в пищу.

5. Проверить условие радиационной безопасности для случая регулярного употребления данного продукта в годовом рационе. Предположив, что сушеные грибы регулярно используются в годовом рационе с коэффициентом разбавления К (по массе) и считая, что вода и другие продукты питания радионуклидов не содержат, найти среднегодовую ***удельную активность рациона*** по стронцию и иттрию:

$$A_{m,S} = A_{m,Y} = A_m / 2К ,$$

где A_m, Бк/кг– удельная активность продукта, найденная по формуле (3.6).

Коэффициент разбавления продукта в годовом рационе принять по указанию преподавателя (или по умолчанию К=100).

Сделать вывод о допустимости регулярного употребления данного продукта в годовом рационе, проверив принцип нормирования в виде

$$\frac{A_{m,S}}{ДУА_S} + \frac{A_{m,Y}}{ДУА_Y} \le 1.$$

3.5. Требования к отчету по лабораторной работе №3

Отчет по работе должен содержать:

1) название, цели работы, состав бригады, дату выполнения;

2) данные метрологической аттестации источника;

3) результаты измерений и расчетов;

4) изложение действий по измерениям излучения пробы, эталонного источника и фона;

5) выводы о допустимости однократного и регулярного употребления исследуемого продукта в пищу.

Контрольные вопросы к лабораторной работе №3

1. Что показывает индикатор измерительного устройства радиометра?
2. Что такое скорость счета?
3. В чем заключается абсолютный метод измерения активности?
4. В чем заключается относительный метод измерения активности?
5. Почему при калибровке радиометра не обязательно вычитать скорость счета, обусловленную фоном? В каких случаях это обязательно?
6. Каков физический смысл формулы (3.5) для оценки минимальной достоверно измеряемой активности?
7. Как влияет время экспозиции на конечный результат измерений?
8. Чем определяется минимальная граница достоверно измеряемой активности?
9. Что такое доверительный интервал? Чем он определяется?
10. Можно ли указать доверительный интервал при однократном измерении?
11. Что такое "предел годового поступления (ПГП)"?
12. Что такое ДУА и ДОА?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Радиационная** безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. В 2-х ч./ Публ. 60 МКРЗ. Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1994. – 399 с.

2. **Федеральный** закон «О радиационной безопасности населения». № 3-ФЗ от 09.01.1996.

3. **Нормы** радиационной безопасности / НРБ-99. – М.: ЦСЭН Минздрава РФ, 1999. – 116 с.

4. **Основные** санитарные правила обеспечения радиационной безопасности / ОСПОРБ-99. – М.: ЦСЭН Минздрава РФ, 2000. – 132 с.

5. **Алентьев, А.Н.** Статистические методы обработки результатов физического эксперимента: учеб. пособие. / А.Н.Алентьев, А.Г.Ильченко, А.Ю.Токов. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им.В.И.Ленина», 2007. – 144 с.

6. **Голубев, Б.П.** Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений / Б.П.Голубев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

7. **Защита** от ионизирующих излучений. В 2 т. Т.1 / Н.Г.Гусев [и др.] – М.: Атомиздат, 1980. – 380 с.

8. **Кутьков, В.А.** Основные положения и требования нормативных документов в практике обеспечения радиационной безопасности атомных станций: учеб.пособие / В.А.Кутьков [и др.] – М: Изд. ОИАТЭ, 2002. – 292 с.

9. **Козлов, В.Ф**. Справочник по радиационной безопасности / В.Ф.Козлов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 520 с.

10. **Таблицы** физических величин: справ. / под ред. И.К.Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

11. **Токов, А.Ю.** Радиационная безопасность и дозиметрия внешнего гамма-излучения: методические указания / А.Ю. Токов, В.А. Крылов, А.Н. Страхов. – ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им.В.И.Ленина», 2009. – 28 с.

12. **Токов, А.Ю.** Определение поглощающей способности материалов и расчет защиты от гамма-излучения: методические указания / А.Ю. Токов, А.Г. Ильченко, А.Н. Страхов. – ФГБОУ

ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им.В.И.Ленина», 2013. – 44 с.

13. **Токов, А.Ю.** Радиационная безопасность и дозиметрия внешнего гамма-излучения: методические указания / А.Ю. Токов, А.Н. Алентьев, А.Г. Ильченко. – ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им.В.И.Ленина», 2013. – 44 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1. **Линейные коэффициенты ослабления μ, см $^{-1}$, для некоторых веществ в зависимости от энергии фотонного излучения**

Eγ, МэВ	Материал					
	Воздух	Вода	Алюминий	Бетон	Железо	Свинец
0,412	$0{,}122 \cdot 10^{-3}$	0,105	0,245	0,216	0,707	2,32
0,5	$0{,}112 \cdot 10^{-3}$	0,0966	0,226	0,200	0,646	1,70
0,662	$0{,}0995 \cdot 10^{-3}$	0,0857	0,201	0,177	0,570	1,18
0,8	$0{,}0914 \cdot 10^{-3}$	0,0786	0,184	0,163	0,520	0,952
1,0	$0{,}0821 \cdot 10^{-3}$	0,0706	0,165	0,146	0,467	0,771
1,25	$0{,}0734 \cdot 10^{-3}$	0,0631	0,148	0,131	0,422	0,658
1,5	$0{,}0668 \cdot 10^{-3}$	0,0572	0,135	0,119	0,381	0,577
ρ,г/см^3	0,0013	1,00	2,70	2,80	7,86	11,34

Таблица П.2. **Поправка к таблице П.2 для расчета фактора накопления $B_б$ точечного изотропного источника в барьерной геометрии ($\delta = B_б / B_\infty$)**

Eγ, МэВ	Материал			
	Вода	Алюминий	Железо	Свинец
0,5	0,750	0,799	0,869	0,983
1,0	0,830	0,845	0,903	0,986
1,25	0,845	0,860	0,909	0,987
2,0	0,892	0,905	0,929	0,989

Таблица П.3. **Дозовый фактор накопления B∞ для различных материалов (точечный изотропный источник в бесконечной среде)**

Eγ, МэВ	Произведение **μx** (показатель ослабления среды)								
	0	1	2	4	7	10	15	20	40
Воздух									
0,5	1,0	2,44	4,84	12,6	31,6	60,6	134	241	1050
0,6	1,0	2,33	4,46	10,9	26,0	47,9	100	173	665
0,8	1,0	2,17	3,94	8,88	19,4	33,5	64,9	105	345
1,0	1,0	2,08	3,60	7,6	15,6	25,8	47,0	72,8	212
1,25	1,0	2,00	3,34	7,22	13,2	21,2	37,4	56,5	156
2,0	1,0	1,83	2,81	4,96	8,61	12,6	20,0	27,9	63,2

Продолжение таблицы П.3

Eγ , МэВ	Произведение **μx** (показатель ослабления среды)								
	0	1	2	4	7	10	15	20	40
Алюминий									
0,5	1,0	2,37	4,24	9,47	21,5	38,9	80,8	141	–
1,0	1,0	2,02	3,31	6,57	13,1	21,2	37,9	58,5	–
1,25	1,0	1,95	3,14	6,08	11,8	18,5	32,0	48,5	–
2,0	1,0	1,75	2,61	4,62	8,05	11,9	18,7	26,3	–
Железо									
0,5	1,0	1,98	3,09	5,98	11,7	19,2	35,4	55,6	–
1,0	1,0	1,87	2,89	5,39	10,2	16,2	28,3	42,7	–
1,25	1,0	1,84	2,77	4,85	9,26	13,8	24,6	38,3	–
2,0	1,0	1,76	2,43	4,13	7,25	10,9	17,6	25,1	–
Свинец (в бесконечной геометрии – B_∞)									
0,15	1,0	1,01	1,03	1,06	1,15	1,16	1,18	1,19	–
0,5	1,0	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73	–
0,662	1,0	1,33	1,56	1,92	2,42	2,88	3,42	4,00	–
1,0	1,0	1,37	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86	–
1,25	1,0	1,38	1,72	2,42	3,27	4,12	5,40	7,40	–
2,0	1,0	1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00	–
Свинец (в барьерной геометрии – $B_Б$)									
0,5	1,0	1,22	1,39	1,66	1,97	2,23	2,61	–	–
1,0	1,0	1,35	1,67	2,22	2,98	3,69	4,75	–	–
1,25	1,0	1,36	1,70	2,30	3,20	4,00	5,29	–	–
2,0	1,0	1,33	1,74	2,48	3,62	4,78	6,80	–	–

Таблица П.4. **Значения дозовых коэффициентов** (ε)**, пределов годового поступления** (ПГП)**, допустимой среднегодовой объемной активности** (ДОА) **для лиц из населения при поступлении радионуклидов через ЖКТ** [3]

Радионуклид	Вид излучения	Поступление с рационом		
		ε, Зв/Бк	ПГП, Бк/год	ДУА, Бк/м^3
Углерод С–14	β^-	$1{,}6\cdot10^{-9}$	$6{,}3\cdot10^{5}$	240,0
Натрий Na–22	β^+, γ	$1{,}5\cdot10^{-8}$	$6{,}7\cdot10^{4}$	43,0
Фосфор Р–32	β^-	$1{,}9\cdot10^{-8}$	$5{,}3\cdot10^{4}$	58,0
Калий К–40	β^+, γ	$4{,}2\cdot10^{-8}$	$2{,}4\cdot10^{4}$	22,0
Кобальт Со–60	β^-, γ	$2{,}7\cdot10^{-8}$	$3{,}7\cdot10^{4}$	41,0
Стронций Sr–90	**β^-**	**$8{,}0\cdot10^{-8}$**	**$1{,}3\cdot10^{4}$**	**5,0**
Иттрий Y–90	**β^-**	**$2{,}0\cdot10^{-8}$**	**$5{,}0\cdot10^{4}$**	**51,0**

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 14.02.01«Атомные электрические станции и установки»

Составитель: М.Н. Мечтаева

Редактор Л.В. Дубова

Подписано в печать . Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Печать плоская. Усл.-печ. л. 3,02. Тираж 50 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.