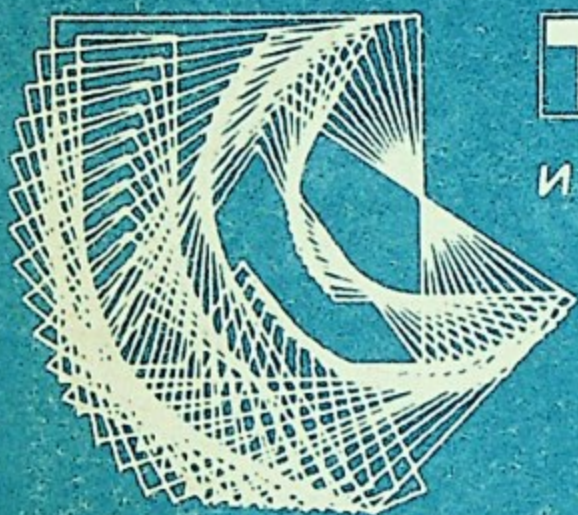


Н. Г. Големинов Е. А. Крамер-Агеев В. С. Трошин



ФАКУЛЬТЕТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**ПРАКТИКУМ
ПО ДОЗИМЕТРИЧЕСКИМ И
РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ ПРИБОРАМ
И СИСТЕМАМ**

Москва 1995

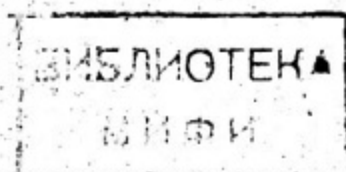
39.1
7.66
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Н.Г. Големинов Е.А. Крамер-Агеев В.С. Трошин

**ПРАКТИКУМ
ПО ДОЗИМЕТРИЧЕСКИМ
И РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ
ПРИБОРАМ И СИСТЕМАМ**

*Утверждено
редсоветом института
в качестве учебного пособия*



Москва 1995

Големинев Н.Г., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Практикум по дозиметрическим и радиометрическим приборам и системам. М.: МИФИ, 1995. — 48 с.

В учебном пособии кратко описаны подходы к проектированию приборов, их структура и направление развития, методы расчета погрешностей и введение поправок, приведены технические задания студентам на компоновку того или иного прибора.

В лаборатории реализован проблемный метод обучения.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям "Радиационная безопасность человека и окружающей среды" и "Радиационная биофизика и экология".

Рецензент: *В.Т. Самосадный*

© Големинев Н.Г., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., 1995 г.

© Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), 1995 г.

ISBN 5-7262-0170-1

Г 2302020600-017
1К9(3) - 95 без объявл.

Редактор *Е.Н. Кочубей*

Техн. редактор *Т.В. Волосикова*

Корректор *Н.Н. Антонова*

Тем. план 1995 г. Лицензия ЛР № 020676 от 9.12.92 г.

Подписано в печать *18.05.95 г.*

Формат 60×84 1/16

Печ.л. *3,0* Уч.-изд.л. *2,5*

Тираж 140 экз.

Изд. № 017-1 Заказ 206

Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет). Типография МИФИ.

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

1. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАДИОАКТИВНОСТИ

Ионизирующие излучения широко применяются в народном хозяйстве: радиационные технологии и стерилизация, бесконтактный контроль уровня жидкостей и толщин металлических лент, контроль сварных швов и рентгенология, активационный анализ и биология, производство интегральных микросхем и поиск нефти и; наконец, энергетика.

Возможное негативное влияние ионизирующих излучений на здоровье человека известно с конца прошлого века. Контроль за потоками ионизирующих излучений, за величиной дозы немыслим без специально созданных приборов. Последствия аварии на ЧАЭС оказались столь значительными, что коснулись миллионов жителей Белоруссии, Украины и России и соответственно вызвали массовое распространение дозиметрической и радиометрической аппаратуры для контроля внешних доз, радиоактивности продуктов питания и самого человека.

Приборы контроля уровней излучения и радиоактивности соответствуют требованиям в зависимости от назначения.

Наиболее представительным классом приборов среди предназначенных для измерений излучений являются радиометры. Обычно выделяют следующие области деятельности, в которых используется радиометрическая аппаратура различной степени сложности:

- контроль и управление ядерными реакторами;
- технологический контроль на предприятиях;
- обеспечение радиационной безопасности;
- разведка полезных ископаемых;
- ядерная медицина и радиобиология;
- научные исследования.

Дозиметрическая аппаратура решает схожие задачи, но в направлении обеспечения допустимых дозовых нагрузок как для проведения технологических процессов, так и для безопасности обслуживающего персонала или населения.

Дозиметрические и радиометрические приборы могут быть: индивидуальными, которые не требуют от пользователя специальной квалификации, не должны мешать основной работе, рекомендуется, чтобы их размеры не превышали 20x10x5 см, а их масса не должна превышать 0,5 кг;

носимыми, предназначенными для контроля уровней радиации обученным персоналом, масса прибора допускается до 8 кг.

переносными, предназначенными для оснащения лабораторий, масса не должна превышать 15 кг;

стационарными, монтируемыми либо на щитах пультовых, либо самостоятельно на специально отведенных местах (например, в раздевалках для контроля загрязнения одежды и тела).

Современное состояние ядерного приборостроения, тенденции развития позволяют сделать важный вывод: средства регистрации излучений становятся многофункциональными, представляющими пользователю самому решать, какими детекторами измерять, как обрабатывать и представлять информацию, какова степень участия человека на этапах работы. Речь идет о системах дозиметрических и радиометрических приборов, которые создаются на основе вычислительно-измерительных комплексов, включающих распределенные вычислительные средства.

Универсальность этих систем не вызывает сомнения, а позволяет исследовать ряд параметров излучения, включая спектры излучения. В этой связи в литературе часто используется термин "радиометр-спектрометр", отражающий новое качество прибора, позволяющее расширить диапазон применения или увеличить информационную ценность результатов.

В основу радиометрической и дозиметрической информации о поле излучения может быть положено измеренное распределение потока частиц или квантов по энергиям. Эти данные, лишние в ряде задач, используются в расчетах параметров поля излучения: при выделении парциальных вкладов различных нуклидов в дозу и в радиоактивное загрязнение, плотность потока и другие характеристики.

При таком разнообразии приборов и технических решений сложно сопоставлять структуры различных систем между собой. Это возможно лишь при детальном анализе составляющих. В любом классическом приборе для измерения излучений таких составляющих четыре: детектор излучения, схема согласования детектора и электроники, регистратор и технический пульт.

В настоящее время основным методом проектирования приборов при их массовом или серийном производстве является блочно-узловой. Функциональный узел — совокупность элементов схемно, конструктивно и технологически завершенная, выполняющая частные функции в приборе, обычно — это печатная плата с контактами. Блок — эксплуатационно неавтономная часть прибора, законченная схемотехнически; выполняющая определенные функции в приборе, пространственно обособленная. Наиболее сложными являются блок детектирования и технический пульт.

Как правило, детекторы дозиметров и радиометров являются генераторами тока. От ионизационных камер дозиметров и сцинтилляционных детекторов сигнал передается на измерительный пульт, как сигнал постоянного или плавно изменяющегося тока. От большинства радиометрических детекторов сигналы передаются в форме импульсов тока отрицательной полярности. При этом сопротивление входной цепи электронных блоков должно быть 50–100 Ом, а выходное блока детектирования — не менее 10 кОм.

Для сигналов с низким уровнем шума (полупроводниковые детекторы, импульсные ионизационные камеры, пропорциональные счетчики рентгеновского излучения) производят зарядовое сопряжение электронных блоков с детектором. При этом выходное сопротивление превышает 1 МОм, выходная емкость — не более 1000 пФ. Сигналы имеют как положительную, так и отрицательную полярность.

При конструировании прибора блок детектирования должен строго соответствовать назначению прибора.

Особые требования предъявляются к узлам согласования в блоках детектирования, особенно в спектрометрических и многофункциональных приборах, в которых должна сохранять-

ся информация о моменте появления сигнала, его форме и амплитуде.

Регистратор — блок прибора, выполняющий функции обработки информации, представленной электрическим импульсом. Роль этого блока диктуется пользователем, и выбор того или иного способа обработки сигнала определяется необходимыми действиями с параметрами импульса. Если требуется анализ амплитуды, то регистратор должен выполнять функции амплитудного анализатора, либо представлять собой дифференциальный дискриминатор с регулируемой шириной окна. В простейшем случае, когда пользователю важно лишь число частиц, зарегистрированных за определенный промежуток времени, достаточным будет применение пересчетного устройства с формирователем на входе или интенсиметра (измерителя среднего числа импульсов).

Между этими полярными возможностями широкий диапазон технических решений, реализация которых зависит от условий задачи.

Технический пульт прибора — средство управления ресурсами системы. В простейших системах роль технического пульта сводится к двум — трем кнопкам и такому же числу переключателей, показывающему прибору, табло или транспаранту. "Чисто", "Грязно" — бинарная информация, характеризующая два уровня без детализации степени чистоты или загрязнения. Более сложные технические пульта имеют цифровые дисплеи, знаковые или символьные индикаторы, средства аналогового отсчета. Современные системы содержат в своем составе дисплей ЭВМ, позволяющий гибко менять назначения в режиме оконного интерфейса на одном поле представления данных.

Характер представления данных может быть более удобным для пользователя: графический, алфавитно-цифровой, табличный, цветовой — режимы, доступные современным средствам отображения и включаемые кодовыми комбинациями с клавиатуры.

Задание режимов с клавиатуры возможно в программно-управляемых приборах, представляющих синтез ЭВМ и блока

детектирования излучения. Построение таких систем выходит за рамки обычных способов проектирования приборов и имеет два направления. В научных исследованиях для таких задач используют модульную электронику системы КАМАК или ВЕКТОР и машины среднего класса, ДВК или СМ. При проектировании акцент делают на применении микропроцессорной техники для решения задач программного управления.

2. ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Многообразие детекторов ионизирующих излучений связано с принципиальной невозможностью использования одного типа детекторов для решения всех задач регистрации.

Каждый вид излучения (альфа-, бета-, гамма-нейтроны) регистрируется в детекторе посредством физических процессов, которые присущи этому виду излучения. Реакция детектора не всегда однозначна. Особенно если частица или квант имеют несколько каналов размена энергии или могут вступать в различные виды взаимодействия.

Наиболее распространенным детектором для радиометрических и дозиметрических приложений является *счетчик Гейгера*. Многообразие форм и конструкций не изменяет основного принципа работы счетчика — возникновение разряда в области ударной ионизации, если в чувствительном объеме возникли электрон-ионные пары. В пределе достаточно одного электрона для инициирования лавины. Основные конфигурации счетчиков — цилиндрическая и торцевая. Причем торцевые имеют пленочное входное окно, толщина которого несколько мг/см^2 , и предназначены для регистрации альфа- и бета-излучения.

Цилиндрические газоразрядные счетчики имеют стальную стенку-катод или стеклянную стенку с внутренним металлическим катодом. Первые предназначены для регистрации бета-частиц и гамма-квантов, а вторые лишь гамма-излучения. Толщина стенок играет большую роль в избирательных свойствах счетчика по отношению к различным излучениям. В счетчике со стальным катодом толщина равна 50 мг/см^2 .

Например, торцевые счетчики со слюдяным окном чувствительны к альфа-частицам, если источник расположен на поверхности окна. Счетчики со стальным катодом регистрируют гамма-кванты и бета-частицы с энергией более 150 кэВ. Электроны и позитроны меньших энергий полностью поглощаются стенками счетчика.

Дозиметрические свойства счетчиков Гейгера основаны на почти линейной зависимости эффективности регистрации фотонов от энергии в диапазоне 0,4-2,5 МэВ и постоянстве с погрешностью ~15% коэффициента передачи энергии. Для использования счетчика в более широком диапазоне энергий необходимы технические приемы выравнивания чувствительности посредством установки фильтров, снижающих скорость счета для квантов малых энергий, благодаря их поглощению вне рабочего слоя стенки.

Использование счетчиков Гейгера в индивидуальных дозиметрах диктуется рядом уникальных технико-экономических показателей: надежностью, стоимостью, долговечностью, упрощенным процессированием сигнала. Последнее свойство счетчика выделяет его из ряда детекторов излучения, которые требуют сложной электроники для усиления импульсов до приемлемой величины. Амплитуды сигнала, которые воспринимают разнообразные счетные схемы, заключены в диапазоне от 0,1 до 10 В. Счетчики Гейгера создают импульсы напряжения такой величины непосредственно без дополнительных каскадов усиления. Особенно важным это преимущество становится в индивидуальных дозиметрических приборах и бытовых индикаторах.

Следующим классом детекторов, широко используемых в радиометрах и дозиметрах, являются *сцинтилляторы*. Различные типы сцинтилляторов: неорганические, органические, пластиковые с наполнителями, системы различных сцинтилляторов, — все это находит применение для решения задач измерения потоковых и дозовых характеристик поля излучения. Исторически первым сцинтиллятором, использовавшимся для наблюдения и регистрации визуальным способом альфа-частиц, был сернистый цинк. Его структура такова, что альфа-частица

в диапазоне изотопных энергий от 4 до 10 МэВ имеет пробег порядка размера зерна, и они эффективно возбуждают люминесценцию микрокристалла. Это обеспечивает при высокой конверсионной эффективности кристалла вспышки световых квантов большой интенсивности, которые легко фиксируются даже адаптированным глазом в поле зрения микроскопа. Не вызывает затруднений регистрация этих вспышек оптоэлектронными преобразователями. Они хорошо выделяются на фоне шума, и при использовании ФЭУ со световодами могут регистрироваться с площади в десятки квадратных сантиметров. Преимущество этого сцинтиллятора еще в том, что благодаря зернистой структуре потери энергии в зернах различны для электронов и альфа-частиц и, следовательно, возможно построение избирательных систем регистрации альфа-частиц.

Для регистрации гамма-излучения широкое применение находят сцинтилляторы на основе монокристаллов NaI(Tl) . Сцинтилляции в объеме кристалла, вызванные вторичными электронами, возникающими при взаимодействии квантов с веществом, характеризуются конверсионной эффективностью около 8%. Этого достаточно для детектирования квантов с энергиями выше 10 кэВ. Особенностью этих сцинтилляторов является большое значение эффективного атомного номера ($Z_{\text{эф}}=50$). Поэтому в сцинтилляторе в широком диапазоне энергий господствует фотоэффект, в процессе которого гамма-квант передает электрону практически всю свою энергию. Сцинтилляторы NaI(Tl) широко используются для избирательной регистрации нуклидов в смеси. Возможность этого предоставляет распределение амплитуд импульсов на выходе фотоэлектронного умножителя: пики соответствуют энергии фотоэлектронов (точнее — пики полного поглощения). С увеличением объема кристалла возрастает площадь, приходящаяся на долю пика полного поглощения. Поэтому в радиометре с кристаллом большого объема можно средствами электронной обработки электрического сигнала с выхода ФЭУ разделить импульсы от разных нуклидов. Высокий атомный номер сцинтиллятора затрудняет его использование для

регистрации бета-частиц, альbedo которых велико, что снижает эффективность радиометрической установки.

Органические сцинтилляторы: стильбен, антрацен, пластики, — близки к водо- и воздухоэквивалентным, их эффективный атомный номер ($5,6 \div 5,8$) несколько ниже эффективного атомного номера воздуха.

Следовательно, для гамма-излучения наиболее эффективным видом взаимодействия будет эффект Комптона. Фотоэффект и образование пар практически отсутствуют. Распределение амплитуд импульсов на выходе ФЭУ будет близко к зависимости сечения эффекта Комптона от энергии электрона, рождающегося в этом процессе. Край распределения (в энергетических единицах) отстоит от энергии гамма-квантов на величину примерно $160 \div 250$ кэВ — значение энергии кванта, рассеянного обратно (на угол $\sim 180^\circ$). Важным свойством органических сцинтилляторов является зависимость времени высвечивания от удельных ионизационных потерь, которые сильно изменяются с изменением заряда частицы.

На дозиметрические свойства детекторов на основе сцинтилляторов влияет энергетическая зависимость чувствительности, которая определяется тремя факторами: изменением конверсионной эффективности с энергией, ослаблением излучения вследствие изменения коэффициента поглощения, энергетической зависимостью коэффициента поглощения энергии. Эти факторы доминируют в различных энергетических диапазонах для органических сцинтилляторов.

Неорганические сцинтилляторы неводухоэквивалентны. Поэтому в дозиметрах используют лишь органические сцинтилляторы и комбинированные, т.е. содержащие добавки неорганических сцинтилляторов, которые компенсируют энергетическую зависимость чувствительности. Однако решение дозиметрической задачи возможно и с использованием неорганического сцинтиллятора, если спектральный состав поля излучения неизменный.

Сцинтилляторы широко используются для регистрации и спектрометрии нейтронов. Это относится к дисперсным комбинированным сцинтилляторам, состоящим из сернистого

цинка в пластике с добавками. Пластик используется как световод и водородосодержащее вещество для регистрации быстрых нейтронов. При взаимодействии ядро отдачи — протон — дает сцинтилляцию в зерне серпистого цинка. Для регистрации тепловых нейтронов используют (n, α) -реакцию и, соответственно, добавка должна содержать литий или бор.

Органические сцинтилляторы стильбен или антрацен можно использовать для регистрации быстрых нейтронов. Упругое взаимодействие с ядрами водорода приводит к возникновению спектра протонов отдачи с равновероятным значением энергии протона вплоть до энергии моноэнергетического нейтрона. Это позволяет с учетом изменения конверсионной эффективности сцинтиллятора проводить спектрометрию нейтронов, предварительно электронными методами устранив импульсы от гамма-квантов, используя различия в форме спада кривой высвечивания.

Следующим видом детекторов, используемых в дозиметрической и радиометрической аппаратуре являются *полупроводниковые детекторы*. Они производятся из различных полупроводниковых материалов. Наиболее распространенные — это кремниевые детекторы, которые выпускаются для целей регистрации альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения. Причем в последнем случае они имеют высокую эффективность и нечувствительность к гамма-фону. Например, детектор тепловых нейтронов ДТН-1 имеет эффективность регистрации тепловых нейтронов порядка 10%, а отношение эффективностей регистрации гамма-квантов и нейтронов не менее 10^{-4} .

Однако широкому применению в аппаратуре мешает их дороговизна и большие затраты на поддержание их работоспособности. В основном они находят применение в спектрометрических задачах. В настоящее время успехи технологии в области создания поверхностно-барьерных детекторов на основе кремния позволяют использовать их в радиометрах альфа- и бета-излучения. Высокие качественные показатели достигаются лишь при использовании сложной электроники, позволяющей усиливать слабые сигналы с выхода детектора. Роль детектора

без прецизионных электронных схем незначительна, и он не выдерживает конкуренции с другими типами детекторов.

Пропорциональные и коронные счетчики в составе радиометрической аппаратуры нужны для регистрации альфа-частиц на фоне мешающих бета- или гамма-излучений.

Существуют различные конструкции счетчиков: с тяжелыми газами для спектрометрии рентгеновского излучения и проточные 4П — счетчики для регистрации бета- и альфа-излучений. Аппаратура, имеющая их в своем составе, как правило, стационарная, предназначенная для использования в лаборатории. Носимые, а тем более индивидуальные системы с использованием пропорциональных счетчиков не производятся.

По ряду параметров ионизационные камеры уступают сцинтилляторам и газоразрядным счетчикам. Тем не менее в дозиметрии они находят широкое применение благодаря своим свойствам. Ток насыщения в газонаполненной камере пропорционален мощности дозы; камеры с водо- или воздухоэквивалентными стенками не имеют энергетической зависимости чувствительности, ток насыщения пропорционален объему камеры — эти закономерности обеспечивают ионизационным камерам функции уникальных дозиметрических детекторов. Использование импульсного режима ионизационной камеры позволяет применять ее для регистрации тяжелых заряженных частиц в радиометрической и спектрометрической аппаратуре. Современные электронные средства дают возможность на основе ионизационных камер малого объема создавать индивидуальные дозиметрические приборы с параметрами недостижимыми иными детекторами. В этих приборах отсутствуют энергетическая зависимость чувствительности и азимутальная зависимость показаний — неотъемлемые особенности индивидуальных средств измерения дозы, выполненных на других типах детекторов.

Для индивидуальной дозиметрии все большее распространение получают *термолюминесцентные детекторы*. Обычно в них применяют монокристаллы фтористого лития, корунд, специальные стекла. Термолюминесцентные дозиметры позволяют определять накопленную дозу в широком диапазоне, до 5-6

порядков (декад). Для устранения зависимости чувствительности от энергии фотонов применяют специально рассчитанные перфорированные фильтры. Считывание показаний производится путем нагрева и регистрации светового потока фотоумножителем. Применяют нагреватели либо с постоянной, либо с линейно нарастающей температурой.

Помимо фотонного и электронного излучений наиболее распространенным является нейтронное излучение. В смешанных полях для радиационной безопасности используют понятие эквивалентной дозы и, соответственно, дозиметры эквивалентной дозы нейтронов. Повсеместно применяют метод предварительного замедления быстрых нейтронов и регистрацию тепловых нейтронов с помощью пропорциональных или сцинтилляционных счетчиков, содержащих бор или литий. Толщина замедлителя подбирается такой, чтобы эффективность регистрации нейтронов в зависимости от энергии максимально соответствовала декретированной зависимости эквивалентной дозы.

Метод замедления применен и в счетчике нейтронов (счетчик Хансена и Мак-Киббена).

Обозначения средств измерения. ГОСТ 27451-87 регламентирует порядок присвоения обозначений средствам измерений ионизирующих излучений. Буквенное обозначение средства измерений должно состоять из трех элементов.

Первый элемент обозначает функциональное назначение средства измерений: Д — дозиметры; Р — радиометры; С — спектрометры.

Второй элемент обозначает физическую величину, измеряемую средством измерений: Д — поглощенная доза излучения; М — мощность поглощенной дозы; Э — экспозиционная доза фотонного излучения; Р — мощность экспозиционной дозы; В — эквивалентная доза излучения; Б — мощность эквивалентной дозы излучения; И — активность радионуклида в источнике; У — удельная активность радионуклида; Г — объемная активность радионуклида в газе; Ж — объемная активность радионуклида в жидкости; А — объемная активность радиоактивного аэрозоля; З — по-

верхностная активность радионуклида; Л — поток ионизирующих частиц; П — плотность потока ионизирующих частиц; С — флюенс ионизирующих частиц; Е — энергетическое распределение ионизирующего излучения; К — две и более физические величины.

Третий элемент обозначает вид ионизирующего излучения: А — альфа-излучение; Б — бета-излучение; Г — гамма-излучение; Р — рентгеновское излучение; Н — нейтронное излучение; С — смешанное излучение.

Обозначение широко распространенных приборов ДРГ означает, что это дозиметрические приборы для измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Обозначение РУБ относится к радиометру удельной активности радионуклида, регистрирующему бета-излучение; СЕГ — спектрометр энергетического распределения гамма-излучения.

3. ЭЛЕКТРОНИКА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Прогресс в области микроэлектроники затронул также принципы построения как индивидуальных, так и стационарных дозиметрических и радиометрических средств измерения. Широкое применение в приборах находят интегральные схемы, модули обработки электрических сигналов детекторов. Появилась возможность создавать многоцелевые приборы, обладающие широким спектром дозиметрических, радиометрических и спектрометрических приложений.

Лаборатория ДРПС основана на отечественной системе модульной электроники, которая ориентирована на решение задач синтеза аппаратуры в крейте без связи с ЭВМ по заданной структурной схеме.

Применение модульной электроники дает возможность гибкого изменения структуры прибора и позволяет проводить исследования структурных схем различного вида. Для учебных целей такой подход удобен по ряду причин: развивает проблемное мышление у студентов, вырабатывает навыки

самостоятельных действий, обеспечивает быструю замену одного технического решения другим. Это дает основу для проектирования электроники радиометрических и дозиметрических систем.

Разнообразные приборы: радиометры, дозиметры, спектрометры, — в своей основе имеют много общего. Наличие детектора, предварительного усилителя, блоков питания делает приборы схожими. Существенно они различаются на уровне систем обработки импульсов и представления информации.

Для простейших приборов оказывается достаточным стрелочные интенсиметры — аналоговые системы отсчета, которые состоят из гальванометра, блока конденсаторов и резистора. Интенсиметр показывает число импульсов, регистрируемых детектором в единицу времени. Эту операцию можно доверить современному пересчетному прибору, состоящему из таймера, декадных счетчиков, цифрового дисплея. Практически вся радиометрическая аппаратура лишена средств предварительного анализа сигнала. Под ними понимаются интегральные и дифференциальные дискриминаторы, которые обеспечивают выделение импульсов, определенной амплитуды. Необходимость таких устройств очевидна для устранения шума, обеспечения избирательной регистрации импульсов определенной амплитуды, анализа спектра амплитуд импульсов. Эти операции проводятся, если требуется регистрировать одно излучение на фоне другого, создающего в детекторе импульсы меньшей амплитуды, если необходимы свойства избирательности по отношению к какому-либо нуклиду, если нужно простыми средствами идентифицировать нуклиды в смеси. Последнюю операцию удобнее всего осуществлять с помощью амплитудного анализатора, но она доступна и радиометрическим средствам, дополненным блоками предварительного анализа сигнала.

Пересчет импульсов — основная процедура, которую выполняют регистраторы радиометров. Роль этой операции — нормировать к единичному интервалу времени число отсчетов, т.е. получить значение интенсивности процесса регистрации импульсов. Пересчетные приборы выполняются в виде

отдельных блоков или самостоятельных приборов, имеющих законченную структуру. Цифровой отсчет, управление временем набора, выбор полярности регистрируемого сигнала, операции контроля работоспособности — практически весь перечень назначений режимов с технического пульта.

Импульсы, подаваемые на вход пересчетных приборов, должны быть сформированы в соответствии с техническими характеристиками прибора. Отклонения в ту или иную стороны нежелательны, так как они могут привести к просчетам или множественной регистрации одного импульса.

Роль формирователей — согласовать выходное и входное сопротивления разных блоков, которые могут сильно различаться. В системах модульной электроники эта операция лишняя, так как они спроектированы для согласованной работы друг с другом.

Анализ тенденций развития приборостроения для радиометрии и дозиметрии показывает преимущество микропроцессорных систем. В этом случае ядро системы — микропроцессорный контроллер — окружено интерфейсами, имеющими программный режим установки функций. В минимальной конфигурации необходимо лишь два интерфейса: входной и выходной. Первый выполняет функции подготовки импульса к регистрации контроллерам, второй служит для представления информации накопленной в контроллере. Управление режимами может быть диалоговым и осуществляться двумя-тремя кнопками. Назначение режима осуществляется выбором нужных значений параметров из предлагаемого списка.

При использовании микроконтроллера даже с простейшими цифровыми дисплеями увеличивается число функций прибора, которые он способен выполнять. Достигается это разветвленным программным обеспечением и возможностями интерфейса, изготовленного для ряда задач с некоторой избыточностью.

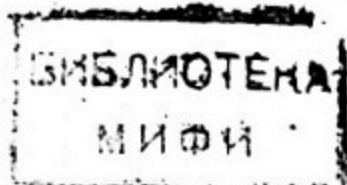
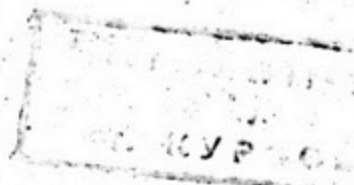
Избыточность (неиспользуемые возможности) практически незаметна и не выходит за пределы общей идеологии обработки сигнала в микропроцессорных системах. Например, преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую —

необходимая операция во всех вычислительно-измерительных комплексах, может быть положена в основу спектрометрических измерений. Обработка спектра, осуществленная контроллером, приводит к получению радиометрических или дозиметрических характеристик поля излучения, которые отображаются на дисплее. Это пример использования информационной избыточности. Поэтому, чем универсальнее система, тем больше возможностей у нее для решения ограниченного круга задач. Однако технико-экономические ограничения сказываются на возможных применениях сверхуниверсальных вычислительно-измерительных комплексов. Это, в первую очередь, стоимость систем и экономическая выгода от ее применения. Во вторую очередь — качество результата и ущерб от потери информации. Умение взвесить эти факторы позволяет сконструировать оптимальную систему для задач, объединенных одной целью.

Электронные средства дозиметрических приборов близки к радиометрическим. Отличия могут составлять лишь системы с ионизационными камерами и с токовым режимом сцинтилляционного счетчика. В них превалируют электронные блоки для измерения слабых и сверхслабых токов. Особенность таких систем заключается в применении прецизионных деталей, обладающих высокой долговременной стабильностью, малыми утечками, большими значениями крутизны преобразования. По сумме свойств до недавнего времени электрометрические лампы не имели конкурентов для применения в головных каскадах электронных блоков усилителей слабых и сверхслабых токов. Реальные значения силы тока $10^{-10} + 10^{-12}$ А не создавали проблемы для измерения.

В настоящее время для этих целей используют каскады согласованных пар на полевых транзисторах, которые надежно работают в этом диапазоне токов. Более стабильными являются полевые транзисторы канального типа, а не транзисторы с индуцированным каналом.

Блоки представления данных в приборах промышленного изготовления ориентированы на применение простейших средств: индикаторов, транспарантов, цветовой сигнализации,



зуммеров. Это общая тенденция, характерная для мирового приборостроения. Лишь в редких случаях вместо аналогового предлагается цифровой отсчет величин. Особенно это характерно для индивидуальных и носимых приборов. Подобный подход основан на преимущественном восприятии человеком шкал аналогового отсчета, где видны тенденции процесса, предельные величины, скорость достижения заданных уровней. Цифровой отсчет дает показания более высокой точности, но для обеспечения правильных выводов оператор должен вычислять разность или сумму трех-четырёхзначных чисел. Эта процедура особенно для неподготовленного оператора затруднительна. Поэтому в проектируемом приборе необходимо уделять должное внимание средствам представления полученных данных.

Наиболее оптимальное сочетание можно получить в системах, основанных на микропроцессорной технике. Решение вопроса о форме представления данных можно доверить системе. С помощью цифро-аналоговых преобразователей организуются аналоговые каналы вывода, а цифровые дисплеи естественным образом управляются микропроцессорной системой. Программная реализация функции обработки информации дает возможность контроля достижения регистрируемым процессом заданных уровней, их повышения, других необходимых характеристик. Важно, что снижаются требования к обслуживающему персоналу, в предельном случае требуется лишь минимальная подготовка.

Вместе с тем, даже в самых передовых научных центрах наряду с самой наисовременнейшей аппаратурой используются приборы прежних поколений. Для ряда задач они выполняют вполне исправно свои функции. С учетом этого неоправданная замена аппаратуры привела бы к расточительству. Поэтому в лаборатории сохранены приборы I, II и III поколений.

4. МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Основные предположения.

1. Случайная погрешность результата измерения распределена по нормальному закону.

2. Систематическая погрешность распределена равномерно (равновероятно).

3. Полная погрешность результата измерения равна сумме случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности.

4. Значения всех погрешностей желательно приводить к доверительной вероятности 0,95.

Обозначения.

$S(x)$ — случайная относительная погрешность величины x ;

$\theta(x)$ — систематическая относительная погрешность величины x ;

$\delta(x)$ — полная относительная погрешность величины x ;

$\Delta_s(x)$, $\Delta_\theta(x)$, $\Delta_\delta(x)$ — абсолютные погрешности;

ω_i — вес результата i -го измерения;

$S_0(x)$ — среднеквадратичное отклонение для результата измерения величины x .

Максимальная граница неисключенного остатка систематической погрешности определения величины x — $\theta_0(x)$.

Погрешность определения непосредственно измеряемой величины x .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}; \quad (1)$$

$$S_0(x) = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \omega_i (x_i - \bar{x})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m \omega_i}}; \quad (2)$$

$$S(\bar{x}) = t_s^m \cdot S_0(\bar{x}); \theta(\bar{x}) = \theta_0(\bar{x}); \delta(\bar{x}) = S(\bar{x}) + \theta(\bar{x});$$

t_s^m — коэффициенты Стьюдента, значения которых приведены в таблице:

Число измерений	3	4	5	6	7	8	9	10
t_s^m	4,30	3,18	2,77	2,57	2,45	3,36	2,31	2,26

Погрешность косвенных измерений величины $y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k)$ в однократном эксперименте. Под однократным экспериментом понимается получение величины из однократно полученных серий величин $\bar{x}_k$:

$$S(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^k S_y^2(\bar{x}_i)}; \quad (3)$$

$$S_y(\bar{x}_i) = \frac{\bar{x}_i}{y} \frac{\partial f}{\partial \bar{x}_i} \cdot S(\bar{x}_i); \quad (4)$$

$$\theta(y) = 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^k \theta_y^2(\bar{x}_i)}; \quad (5)$$

$$\theta_y(\bar{x}_i) = \frac{\bar{x}_i}{y} \frac{\partial f}{\partial \bar{x}_i} \cdot \theta_0(\bar{x}_i); \quad (6)$$

$$\delta(y) = S(y) + \theta(y).$$

Погрешность косвенных измерений величины $y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k)$ в многократном (m) эксперименте. В многократном эксперименте серии величины $\bar{x}_k$ получаются m раз и для каждой серии вычисляются значения y_i :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}; \quad \omega_i = 1/\delta^2(y_i); \quad (7)$$

$$\delta(\bar{y}) = \frac{1,96}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \omega_i (y_i - \bar{y})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m \omega_i}}. \quad (8)$$

Примечание. Предположение о том, что суммарная погрешность есть сумма случайной и систематической составляющих при выбранных законах распределения не является строгим в математическом смысле. Действительно, если в качестве меры погрешности рассматривать корень квадратный из дисперсии, то полная погрешность

$$\delta(x) = \sqrt{s^2(x) + \frac{1}{3} \theta^2(x)}.$$

Однако в этом случае при $S(x) \rightarrow 0$ получается лишенный физического смысла результат. Наиболее обоснованным результатом является

$$\delta(x) = \sqrt{S^2(x) + \theta^2(x)}.$$

Однако это справедливо только в случае, если систематическая погрешность распределена по нормальному закону.

ВНИИФТРИ Госстандарта СССР рекомендует оценивать полную относительную погрешность по формуле:

$$\delta(x) = S(x) + \theta(x).$$

Вычисление погрешностей при учете фона. Измеряются величины n и n_{ϕ} . Получаем при m -кратных измерениях этих величин средние значения и случайные относительные погрешности:

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m}; \quad \bar{n}_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{\phi i}}{m}; \quad \bar{n}_0 = \bar{n} - \bar{n}_{\phi};$$

$$S(\bar{n}) = t_s^m \frac{1}{\bar{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - \bar{n})^2}{m(m-1)}}; \quad S(\bar{n}_{\phi}) = t_s^m \frac{1}{\bar{n}_{\phi}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_{\phi i} - \bar{n}_{\phi})^2}{m(m-1)}};$$

$$S(\bar{n}_0) = \sqrt{\left(\frac{\bar{n} S(\bar{n})}{\bar{n}_0}\right)^2 + \left(\frac{\bar{n}_{\phi} S(\bar{n}_{\phi})}{\bar{n}_0}\right)^2}.$$

Градировка приборов изотопными источниками. Условия градуировки зависят от типа градуируемого прибора и используемого изотопного источника. Наиболее часто для градуировки используются изотопные источники малых размеров, т.е. практически точечные источники. Обычно встречаются два случая при градуировке: эффективность регистрации должна быть получена в фиксированных условиях "источник — детектор" и эффективность регистрации практически не зависит от положения "источник — детектор".

В первом случае для градуировки используется один (либо несколько) образцовых источников, помещаемых на фиксированном расстоянии от детекторов. Предпочтительно использование набора источников, перекрывающих рабочий диапазон детектора. Использование набора источников позволяет

уменьшить систематическую погрешность градуировки. Чаще всего этот случай реализуется при градуировке α - и β -радиометров.

Эффективность регистрации, полученная при измерении с источником:

$$\varepsilon_i = \frac{\bar{n}_i}{Q_i},$$

где $\bar{n}_i$ — скорость счета детектора; а Q_i — количество частиц, выходящих из источника в единицу времени.

Относительная погрешность определения ε_i складывается из статистической погрешности определения $\bar{n}_i$ и систематической погрешности определения Q_i :

$$\delta(\varepsilon_i) = S(\bar{n}_i) + \theta(Q_i).$$

Среднее значение эффективности по набору источников может быть получено либо усреднением отдельных измерений, либо методом наименьших квадратов (МНК).

1. Усреднение отдельных измерений

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}, \quad (9)$$

где ω_i — вес каждого значения ε_i при усреднении. В качестве веса может быть выбрана величина, обратно пропорциональная квадрату относительной погрешности величины ε_i , т.е.

$$\omega_i = 1/\delta^2(\varepsilon_i).$$

Относительная погрешность среднего значения эффективности в этом случае

$$\delta(\bar{\varepsilon}) = \frac{1.96}{\bar{\varepsilon}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \omega_i (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m \omega_i}} \quad (10)$$

2. Метод наименьших квадратов. Минимизируется функционал

$$F = \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{Q_i \varepsilon}{\bar{n}_i} \right)^2$$

Решение уравнения $\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = 0$;

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{\bar{n}_i}}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_i}{\bar{n}_i} \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\varepsilon_i}}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^2} \quad (11)$$

Статистическая и систематическая погрешности определения могут быть получены из формул (3)–(6) и равны соответственно

$$S(\varepsilon) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{2 \left(\frac{Q_i}{\bar{n}_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_i}{\bar{n}_i} \right)^2} - \frac{\frac{Q_i}{\bar{n}_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{\bar{n}_i}} \right]^2} \cdot S^2(\bar{n}_i); \quad (12)$$

$$\theta(\varepsilon) = 1.1 \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{2 \left(\frac{Q_i}{\bar{n}_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_i}{\bar{n}_i} \right)^2} - \frac{\frac{Q_i}{\bar{n}_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{\bar{n}_i}} \right]^2} \cdot \theta^2(Q_i). \quad (13)$$

Суммарная погрешность $\delta(\epsilon) = S(\epsilon) + \theta(\epsilon)$. В случае, когда эффективность регистрации практически не зависит от положения "источник — детектор", обычно градуировка проводится одним точечным источником. При этом необходимо учитывать, что для детекторов относительно больших размеров эффективный центр регистрации может не совпасть с геометрическим, и его положение в выбранной системе отсчета априори неизвестно.

В этом случае градуировка проводится следующим образом: измеряется скорость счета (показания) детектора в зависимости от расстояния (обычно так градуируются нейтронные и гамма-детекторы).

На расстояниях, для которых выполняется закон обратных квадратов, скорость счета равна:

$$\bar{n}_i = \frac{Q \cdot \eta}{4\pi(R_i + x)^2}, \quad (14)$$

где η — чувствительность детектора, $\eta = S \cdot \epsilon$ (S — площадь сечения детектора, ϵ — эффективность регистрации); x — положение эффективного центра регистрации в выбранной системе отсчета расстояний.

При градуировке требуется, с одной стороны, установить область выполнения закона обратных квадратов, с другой — определить эффективность (чувствительность) детектора.

Область выполнения закона обратных квадратов может быть получена анализом зависимости $(\sqrt{\bar{n}_i})^{-1} = f(R_i)$, так как

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{n}_i}} = \sqrt{\frac{4\pi}{Q \cdot \eta}} \cdot (R_i + x). \quad (15)$$

Рассматриваются расстояния, при которых $\bar{n}_i^{-\frac{1}{2}}$ линейно зависит от R_i . Из анализа этой зависимости можно получить и x (экстраполяция линейной зависимости к нулю).

Чувствительность может быть получена либо по одному измерению, либо усреднением по всему диапазону R_i , подчиняющихся закону (14).

Для одного расстояния

$$\eta_i = \frac{4\pi}{Q} (R_i + x)^2 \bar{n}_i; \quad (16)$$

$$S(\eta_i) = S(\bar{n}_i);$$

$$\theta(\eta_i) = 1,1 \sqrt{\theta^2(Q) + \left(\frac{2x\theta(x)}{R_i + x} \right)^2}, \quad (17)$$

где $S(\bar{n}_i)$ — статистическая погрешность определения $\bar{n}_i$; $\theta(Q)$ и $\theta(x)$ — систематические погрешности определения Q и x соответственно.

Систематическая погрешность x зависит от способа его определения. При графическом способе определения x можно рекомендовать следующую методику определения систематической погрешности. Строится зависимость $y_i = (\bar{n}_i)^{-1/2} = f(R_i)$ и откладываются абсолютные погрешности y_i :

$$\Delta_s(y_i) = \frac{1}{2\sqrt{\bar{n}_i}} S(\bar{n}_i).$$

Значение x определяется экстраполяцией к нулю прямой, наименее уклоняющейся от экспериментальных значений. Максимальная и минимальная оценки x получаются проведением прямых, проходящих через крайние значения погрешностей.

В качестве границы распределения систематической погрешности (θ_0) выбирается наибольшее значение из двух величин

$$\frac{x_{\max} - x}{x} \text{ и } \frac{x - x_{\min}}{x}.$$

Полная относительная погрешность $\delta(\eta_i) = S(\eta_i) + \theta(\eta_i)$. При усреднении по всем значениям η_i , подчиняющимся закону (14), получаем:

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \eta_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i},$$

где $\omega_i \sim 1/\delta^2(\eta_i)$, и относительная погрешность среднего значения

$$\delta(\bar{\eta}) = \frac{1.96}{\bar{\eta}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \omega_i (\eta_i - \bar{\eta})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m \omega_i}}.$$

5. ЗАДАНИЕ НА РАЗРАБОТКУ ПРИБОРОВ

1. Альфа-радиометры.

1.1. Радиометр для определения загрязненности альфа-активными веществами. Ожидаемая плотность потока альфа-частиц $0,5-20 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, гамма-фон практически не превышает уровень естественного фона.

1.2. Радиометр для определения содержания урана в толстом образце по измерению выхода альфа-частиц. Ожидаемая плотность потока альфа-частиц $0,5-20 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при фоне гамма-излучения до $10 \text{ нГр} \cdot \text{с}^{-1}$.

1.3. Радиометр для определения загрязненности поверхности полов, стен, столов и т.д. альфа-активными веществами. Ожидаемая плотность потока α -частиц $0,5-20 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, фон гамма-излучения $500 \text{ нГр} \cdot \text{с}^{-1}$.

1.4. Прибор по измерению плотности потока альфа-частиц от 10^2 до $10^4 \text{ част.}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ на фоне жесткого гамма-излучения мощностью дозы $1 \text{ мкГр} \cdot \text{с}^{-1}$.

Л и т е р а т у р а :

- [1], с.363, 369–372.
- [2], с.13–21, 149–152, 160, 197–201; 237–238.
- [3], с.132–141; 225–234.
- [4], с.170–173; 192–196; 204–208; 219–225; 234–242; 264–296; 316–350.

2. Бета-радиометры.

2.1. Радиометр по определению активности образцов по выходу бета-излучения $A=10^{-10^4}$ Бк (фон естественный). Площадь образцов 1 см^2 .

2.2. Радиометр по определению плотности потока электронов с поверхности бета-излучателей типа ^{14}C . Ожидаемая плотность потока частиц $10^2-10^3\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

2.3. Радиометр для измерения плотности потока бета-частиц на фоне гамма-излучения. Ожидаемая плотность потока бета-частиц $10-100\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Мощность дозы гамма-излучения $R=10\text{ нГр}\cdot\text{с}^{-1}$.

2.4. Радиометр для измерения загрязненности рабочих поверхностей, рук, одежды и т.д. Фон гамма-излучения на уровне предельно допустимого.

2.5. Радиометр по определению активности образцов по выходу бета-излучения $A=10^{-2}\div 10^2$ Бк (фон естественный, площадь образцов 1 см^2).

Л и т е р а т у р а :

- [1], с.363–373.
- [2], с.163–173, 201–204, 243, 244.
- [3], с.137–141; 225–275.
- [4], с.170–173; 178–183; 192–196; 204–208; 219–230; 234–242; 264–296; 316–350.

3. Радиометры нейтронов.

3.1. Радиометр быстрых нейтронов. Ожидаемая плотность потока частиц $1-100\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Фон гамма-излучения: 1 гамма-квант/1 нейтрон.

3.2. Радиометр быстрых нейтронов. Ожидаемая плотность потока частиц $1-100 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Фон гамма-излучения до $1 \text{ мкГр}\cdot\text{с}^{-1}$.

3.3. Радиометр тепловых нейтронов. Ожидаемая плотность потока частиц $1-100 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Фон гамма-излучения до $10 \text{ мкГр}\cdot\text{с}^{-1}$.

3.4. Радиометр быстрых, промежуточных и тепловых нейтронов. Ожидаемая плотность потока частиц $1-100 \text{ нейтр.}/(\text{с}\times\text{см}^2)$. Фон гамма-излучения до $1,0 \text{ мкГр}\cdot\text{с}^{-1}$.

3.5. Радиометр-спектрометр быстрых нейтронов. Ожидаемая плотность потока частиц $10^3 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, фон гамма-излучения до $10 \text{ нГр}\cdot\text{с}$.

Л и т е р а т у р а :

[1], с.186-197; 101-208; 222-224.

[2], с.161-165; 168-171; 185-186.

[3], с.110-116; 317-324, 326-345, 347-349.

[4], с.102-104, 170-173, 180-184, 192-196, 204-208, 219-225, 230-248, 264-296, 316-350, 370-375.

4. Радиометры фотонов, измерители интенсивности гамма-излучения.

4.1. Избирательный радиометр для определения наличия данного радионуклида ($E=0,661 \text{ МэВ}$) на фоне мешающих нуклидов, испускающих фотоны с энергией до нескольких мегаэлектронвольт. Плотность потока фотонов до $10^3 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

4.2. Радиометр фотонов в диапазоне энергий $0,2-1,5 \text{ МэВ}$. Плотность потока $10-10^3 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Сопровождающее бета-излучение с плотностью потока $10-10^3 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

4.3. Измеритель интенсивности (плотности потока энергии) фотонного излучения для фотонов с энергией $0,2-1,5 \text{ МэВ}$. Ожидаемая плотность потока $10^2-10^5 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

4.4. Избирательный радиометр направленного действия для регистрации фотонного излучения ($E=0,661 \text{ МэВ}$) на фоне более энергетичных фотонов. Ожидаемая плотность потока частиц $10^2-10^4 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

4.5. Измеритель интенсивности фотонного излучения для фотонов с энергиями от 7 до 50 кэВ в поле гамма-излучения с мощностью дозы до $10 \text{ мГр} \cdot \text{с}^{-1}$.

Л и т е р а т у р а :

- [1], с.71–100, 130–137.
[2], с.98–146, 171–173.
[3], с.49–76, 86–88, 93–100, 176–184, 192–196, 204–208, 219–220, 225–230, 234–248, 264–296, 316–347, 359–364.

5. Дозимстры.

5.1. Дозиметр мощности поглощенной дозы (в ткани) гамма-излучения на диапазоне $20\text{--}20000 \text{ нГр} \cdot \text{с}^{-1}$ для фотонов с энергиями от 0,2 до 2 МэВ.

5.2. Прибор для измерения мощности эквивалентной дозы рентгеновского излучения (напряжение на трубке от 20 до 45 кВ). Ожидаемый диапазон от 800 до $8000 \text{ нЗв} \cdot \text{с}^{-1}$.

5.3. Прибор для измерения эквивалентной дозы рентгеновского излучения в диапазоне от 8 до 80 мкЗв при мощности эквивалентной дозы до $0,01 \cdot 10^{-3} \text{ Зв} \cdot \text{с}^{-1}$ (напряжение на трубке от 20 до 45 кВ).

5.4. Прибор для измерения эквивалентной дозы фотонного излучения на диапазон от 1×10^{-4} до $1 \times 10^{-3} \text{ Зв}$ при мощности эквивалентной дозы до 1 мкЗв.

5.5. Прибор для измерения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения. Диапазон от 1 до $10^4 \text{ нЗв} \cdot \text{с}^{-1}$.

Л и т е р а т у р а :

- [1], с.44–68, 71–101, 130–139, 186–207, 219–224.
[3], с.98–116, 171–192, 317–324, 326–345, 347–349.
[4], с.77–88, 108–173, 176–180, 192–194, 204–208, 220, 264–277, 287–296, 339–343, 365–370.

6. Приборы, подлежащие ремонту и отладке. Произвести ремонт:

- широкополосного импульсного усилителя;
- пересчетной установки;
- интегрального дискриминатора;

– осциллографа;

– радиометра.

Отладить дифференциальный анализатор.

Л и т е р а т у р а :

[6], с.21–30.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И. Дозиметрия ионизирующих излучений М.: Атомиздат, 1970.

2. Прайс В. Регистрация ядерного излучения. М.: Атомиздат, 1960.

3. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Избирательные радиометры. М.: Атомиздат, 1975.

4. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1972.

5. Кеппим-Маркус И.Б. Эквидозиметрия. М.: Атомиздат, 1980.

6. Паньков С.А. Ремонт и настройка электронных приборов ядерной физики. М., 1972.

6. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ РДП

Техническое задание

Разработать дозиметр поглощенной тканевой дозы рентгеновского излучения, возбуждаемого линейным ускорителем электронов.

Диапазон доз $1-10^2$ Гр.

Энергия электронов 10 МэВ.

Длительность импульса 1 мкс, частота следования 100 Гц.

Энергия фотонов за свинцовым фильтром: 0,3–10 МэВ.

Мощность дозы фотонного излучения 0,10 Гр/с.

Рекомендуемая литература

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии. М.: Атомиздат, 1970, с.48–80, 106–110, 112–121.

2. Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. М.: 1957, с.105–163; 397–419.

3. Коляда В.М., Карасев В.С. Калориметрия излучения ядерного реактора. М., 1974, с.36–48; 60–114.

(После домашней проработки материала, используя лекционные записи и рекомендуемую литературу, студент представляет краткое описание технического предложения.)

Техническое предложение

Дозиметр поглощенной тканевой дозы рентгеновского излучения, возбуждаемого линейным ускорителем электронов.

Диапазон доз $1-10^2$ Гр.

Энергия электронов 10 МэВ.

Энергия фотонов 0,3–10 МэВ.

Мощность дозы 0,10 Гр/с.

Частота импульсов 100 Гц.

Длительность импульса 1 мкс.

Режим работы линейного ускорителя – импульсный. Доза, создаваемая за один импульс, составляет 1 мкГр. Однако мощность дозы весьма велика и равна 10^3 Гр/с. Для решения поставленной задачи можно применять ионизационный, сцинтилляционный и калориметрический методы. Рассмотрим эти методы:

1. Ионизационный метод. Большая величина мощности дозы не вызывает затруднений при регистрации ионизационного тока. В соответствии с рекомендациями зазор не должен быть меньше 0,5–1 мм (лекции по курсу РДП). Приняв зазор h равным 1 мм, оценим требуемое напряжение, прикладываемое к электродам камеры. Примем коэффициент собирания $f=0,99$. Тогда в соответствии с формулами, приведенными в [1], считая излучение непрерывным, найдем напряжение

$$U = 15,0h^2 \left(\frac{P}{1-f} \right)^{1/2} = 50В.$$

Если за время между импульсами ускорителя ионы успевают завершить дрейф к электродам, то

$$U = 5 \cdot 10^4 \frac{D}{1-f} = 50 \text{ В.}$$

Таким образом, при заданных условиях обе оценки напряжения совпадают.

При определении требуемого объема исходим из возможности использовать полевой транзистор в качестве входного элемента электронной схемы регистрации. Для транзистора КПЗОЗГ ток затвора не превышает 10^{-10} А. Для того чтобы избежать влияние флуктуаций и дрейфа шумового тока затвора, оценим объем, исходя из величины ионизационного тока, равной 10^{-3} А:

$$V > 3 \cdot 10^{11} \left(\frac{I}{P} \right) \approx 300 \text{ мм}^3.$$

Принимая форму камеры цилиндрической и считая размеры электродов значительно превышающими зазор, получим, что произведение высоты на радиус должно превышать 48 мм^2 . Выберем длину ионизационного объема камеры равной 12 мм, внутренний радиус — 3,5 мм, наружный 4,5 мм. Хотя при измерении дозы в греях и не выдвигается требование электронного равновесия, желательно, тем не менее, выбрать толщину стенки камеры, соответствующую максимуму ионизации. Спектр рентгеновского излучения по интенсивности без учета фильтрации подчиняется линейному закону $(I - E/E_{\text{макс}})$. Так как толщина фильтра из свинца не задана, примем для простоты, что спектр по интенсивности круто обрывается при энергии 0,3 МэВ. В диапазоне 0,3–7,0 МэВ с погрешностью $\pm 15\%$ можно считать коэффициент поглощения энергии в биологической ткани постоянным. Среднее значение энергии фотонов такого спектра равно 4,4 МэВ. Для моноэнергетического "жесткого" излучения в лекциях рекомендуется выбирать толщину стенки, равную 0,8 максимального пробега электронов. В качестве первого приближения толщина стенки равна

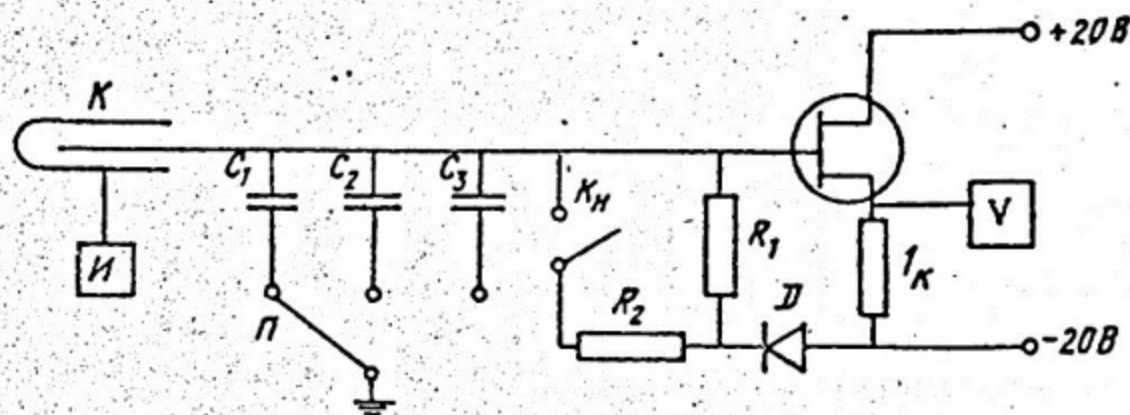
2,2 г/см² биологической ткани или 24 мм полиэтилена. Окончательный выбор толщины стенки будет произведен экспериментально по максимуму ионизационного тока при наращивании толщины.

2. Калориметрический метод. Для измерения поглощенной дозы излучения лучше всего применять адиабатический калориметр, у которого температура наружной стенки поддерживается такой же, как и рабочего тела. При мощности дозы 0,10 Гр/с максимальная доза создается за время 10^3 с, минимальная — за 10 с. Прирост температуры $\Delta T = D/C_m$, где D — поглощенная доза; C_m — теплоемкость; 2 Дж/(г·град). Отсюда минимальный разогрев рабочего тела $5 \cdot 10^{-4}$ град, а максимальный $5 \cdot 10^{-2}$ град. Хотя современная калориметрия и позволяет надежно производить измерения разности температур 10^{-5} град, но такие установки требуют термостатирования и являются уникальными.

3. Сцинтилляционный метод. В качестве подходящего сцинтиллятора для дозиметра может быть выбран полистирол с соответствующими добавками. Его размеры должны соответствовать толщине стенки ионизационной камеры. Диаметр 50 мм и высота 50 мм. Такой сцинтиллятор удачно сопрягается с ФЭУ-13. Основной проблемой использования сцинтилляционного детектора в интенсивных полях является радиационная стойкость сцинтиллятора и стекла колбы ФЭУ. По данным книги "Сцинтилляционные детекторы" (автор М.Н.Медведев) доза 10^4 Гр вызывает уменьшение светимости в 1,5–2 раза. Поэтому ограниченный ресурс работы сцинтилляционного детектора ставит под сомнение рациональность его использования в разрабатываемом дозиметре.

Предложение

Ионизационный дозиметр (см. схему). Камера с толщиной стенки 24 мм цилиндрической формы. Наружный диаметр 57 мм, внутренний 9 мм. Диаметр центрального электрода 7 мм, длина внутренней полости 12 мм. На торцах камера должна иметь сферическое округление.



Блок-схема дозиметра:

К — камера; И — источник напряжения для подачи потенциала на электроды камеры; C_1 , C_2 , C_3 — накопительные емкости; П — переключатель; К — кнопка сброса; R_1 — сопротивление затвора; Д — термостабилизирующий кремниевый диод

Значение RC входной цепи подбирается из условия $RC > t$ измерения. Чтобы снизить влияние входной емкости и емкости монтажа, примем $C_1 = 1000$ пФ. Тогда значение R_1 будет равно 100 ГОм.

Значение потенциала на емкости при измерении на самом чувствительном диапазоне равно 1 В. Соответственно для 2-го и 3-го диапазонов значения емкостей равны 0,01 и 0,1 мкФ. Для измерения напряжения можно применять любой ламповый вольтметр с выходным сопротивлением не менее 100 кОм.

Примечание: время подготовки такого технического предложения составляет 5–6 часов.

План проведения экспериментальной проверки работоспособности дозиметра

1. Собрать макет прибора из готовых узлов.
2. Провести проверку работоспособности прибора от источника тока (батарея — высокоомное сопротивление).
3. На ускорителе определить оптимальное значение толщины стенки камеры.

4. Провести градуировку дозиметра с помощью кобальтового источника. (Однако в соответствии с расчетом даже при расстоянии между камерой и детектором в 10 см потребуется источник 40 мг-экв радия. Поэтому для калибровки воспользуемся калиброванным полем какого-либо облучателя. Градуировка дозиметра проводится не менее 5 раз.

5. Определить среднее значение градуировочной константы и ее погрешность, которая складывается из случайной погрешности измерений при градуировке и систематической погрешности в величине мощности дозы калиброванного поля:

$$\delta = S(i) + \theta_0(i).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ I

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ДОЗЫ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА И ПРЕДЕЛЫ ДОЗ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЛИЦ ИЗ НАСЕЛЕНИЯ

Группа критических органов	Критические органы или ткани	Доза облучения, мЗв/год	
		персонала	отдельных лиц из населения
I	Все тело, гонады, красный костный мозг	50	5
II	Любой отдельный орган, кроме органов, входящих в гр. I, III	150	15
III	Костная ткань, кожный покров всего тела, кисти, предплечья, голени, стопы	300	30

2. ДОПУСТИМЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Объект загрязнения	Поток, см ⁻² ·мин ⁻¹		
	альфа-излуч. нуклиды	бета-излуч. нуклиды	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
Кожные покровы	1	100	20
Спецодежда	5	800	160
Поверхность рабочих помещений постоянного пребывания персонала	5	2000	400
Поверхность рабочих полуобслуживаемых помещений	50	8000	1600
Для альфа-загрязненных поверхностей нормируется снимаемое загрязнение			

3. ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ЧАСТИЦ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ДОЗЕ ПРИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ ПЕРСОНАЛА (36-ЧАСОВАЯ РАБОЧАЯ НЕДЕЛЯ) ПРИ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ $80 \text{ нЗв}\cdot\text{с}^{-1}$ (ИЛИ 280 мкЗв/ч)

Вид излучения	ДПП, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
Бета-частицы:	
максимальная энергия 0,5 МэВ	38
максимальная энергия 1,0 МэВ	78
максимальная энергия 2,5 МэВ	120
Быстрые нейтроны 1+100 МэВ	20
Тепловые нейтроны	910

4. МАССОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ФОТОНОВ ($\text{см}^2\cdot\text{г}^{-1}$)

Е, кэВ	Алюминий	Сталь	Свинец	Вода	Иод, натрий
5	183	—	—	39,6	831
6	110	—	—	22,9	561
8	49,1	—	—	9,68	259
10	25,7	169	124	4,87	140
15	7,97	54,5	110	1,45	45,7
20	3,19	24,4	83,1	0,676	20,6
30	0,973	7,86	28,6	0,314	6,51
40	0,473	3,45	13,3	0,233	18,40
50	0,308	1,82	7,30	0,204	10,1
150	0,131	0,179	1,90	0,148	0,579
200	0,119	0,136	0,933	0,135	0,310
300	0,102	0,105	0,369	0,118	0,156
600	0,0775	0,0758	0,117	0,0895	0,080
800	0,0681	0,0662	0,084	0,0786	0,066
1000	0,0612	0,0594	0,068	0,0707	0,058
1500	0,0500	0,0486	0,051	0,0594	0,046

5. МАССОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ФОТОНОВ
($\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$)

Вещество	энергия, кэВ							
	10	20	30	100	200	500	1000	1500
Воздух	4,57	0,501	0,037	0,023	0,027	0,030	0,028	0,025
Вода	4,72	0,505	0,038	0,025	0,030	0,033	0,031	0,026
Иод.натрий	132	20	5,73	1,17	0,208	0,042	0,027	0,023

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. α 1-1 (^{239}Pu)

$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 π	$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 π	$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 π
177	2,24	180	84	183	2000
178	8,1	181	210	184	1000
179	19,6	182	800	185	19700

Площадь активной зоны 1 см² (диаметр 1,2 см). Допустимые отклонения измеренных значений от номинала в пределах $\pm 20\%$.

2. ОСГИ-НАБОР ОБРАЗЦОВЫХ ИСТОЧНИКОВ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ

Изотоп	E_{γ} , МэВ	Изотоп	E_{γ} , МэВ	Изотоп	E_{γ} , МэВ
^{65}Zn	1,12	^{22}Na	0,511	^{113}Sn	0,392
			1,27		0,255
^{54}Mn	0,84	^{60}Co	1,17	^{57}Co	0,123
^{137}Cs	0,66		1,3		0,136
^{203}Hg	0,279	^{241}Am	0,0596	^{22}Y	1,836
^{139}Ce	0,165		0,0264		0,898

Начальная активность источников определена с погрешностью $\pm 3\%$. Диаметр активной зоны 0,8 см.

3. β 1-11 ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$)

$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 π	$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 π
10437	2,5	10465	$2,18 \cdot 10^3$
10440	4,8	10469	$5,8 \cdot 10^3$
10447	31,0	10471	$8,5 \cdot 10^3$
10453	119,0	10473	$1,22 \cdot 10^4$
10461	870	10475	$2,58 \cdot 10^4$

Площадь активной зоны 1 см². Диаметр 1,2 см. Активная поверхность защищена алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм. Допустимые отклонения измеренных значений от номинала в пределах $\pm 20\%$. Всего в наборе 29 источников. Активность источников дана на декабрь 1967 г., $T_{1/2} = 28,4$ г.

4. β 1-15 (¹⁴C)

$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 τ	$N_{\text{ист}}$	Поток в 2 τ
C-11	980	C-33	140
C-16	850	C-3	110
C-110	300		

Площадь активной зоны 1 см². Диаметр 1,2 см. Погрешность измерения активности $\pm 20\%$. Толщина защитного слоя 0,11 мг/см².

5. ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ

Источник	A	Погрешность измерения активности, %	Диаметр, см	Длина, см
Pu-Be(H1-5)	$4,2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$	± 10		
Pu-Be(H1-4)	$3,55 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$	± 10		
¹³⁷ Cs	103 мг-экв Ra (на март 1965 г.)	± 20 ($1,03 \cdot 10^{10}$ Бк)		
¹³⁷ Cs	4,6 мКи (на ноябрь 1976 г.)	± 20 ($1,7 \cdot 10^8$ Бк)	0,5	12
⁶⁰ Co	0,117 мг-экв Ra (на ноябрь 1977 г.)	± 25 ($2,8 \cdot 10^6$ Бк)	0,7	0,7

В лаборатории могут быть источники γ -излучения иных изотопов и активностей.

6. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Нуклид	$T_{1/2}$ годы	Энергия фотонов, кэВ	Выход, %	Гамма-постоянная, (аГр·м ²)/(с·Бк)
⁴⁰ K	$1,28 \cdot 10^9$	1461	10,7	—
⁵⁷ Co	0,744	122,1	85,4	3,67
		136,5	10,7	
		692	0,2	
⁶⁰ Co	5,27	1173	99,85	83,89
		1333	99,98	
⁶⁵ Zn	0,668	1115,6	50,75	20,12
¹⁰⁹ Cd	1,241	88,03	3,65	0,094
¹³⁴ Cs	2,062	604,7	97,6	57,1
		795,8	85,4	
		801,9	8,46	
		661,7	85,3	
¹³⁷ Cs	30,18	279	81,5	8,51
²⁰³ Hg	0,128	2448	1,65	59,45
²²⁶ Ra (в равновесии)	1600	1764	16,6	
		1120	16,0	
		609	48,4	
		352	39,3	
		295	20,1	
		78,9	22,3	
		59,5	35,7	
²⁴¹ Am	432,2	26,3	2,4	
		13,9	24,4	
		17,5	30,5	

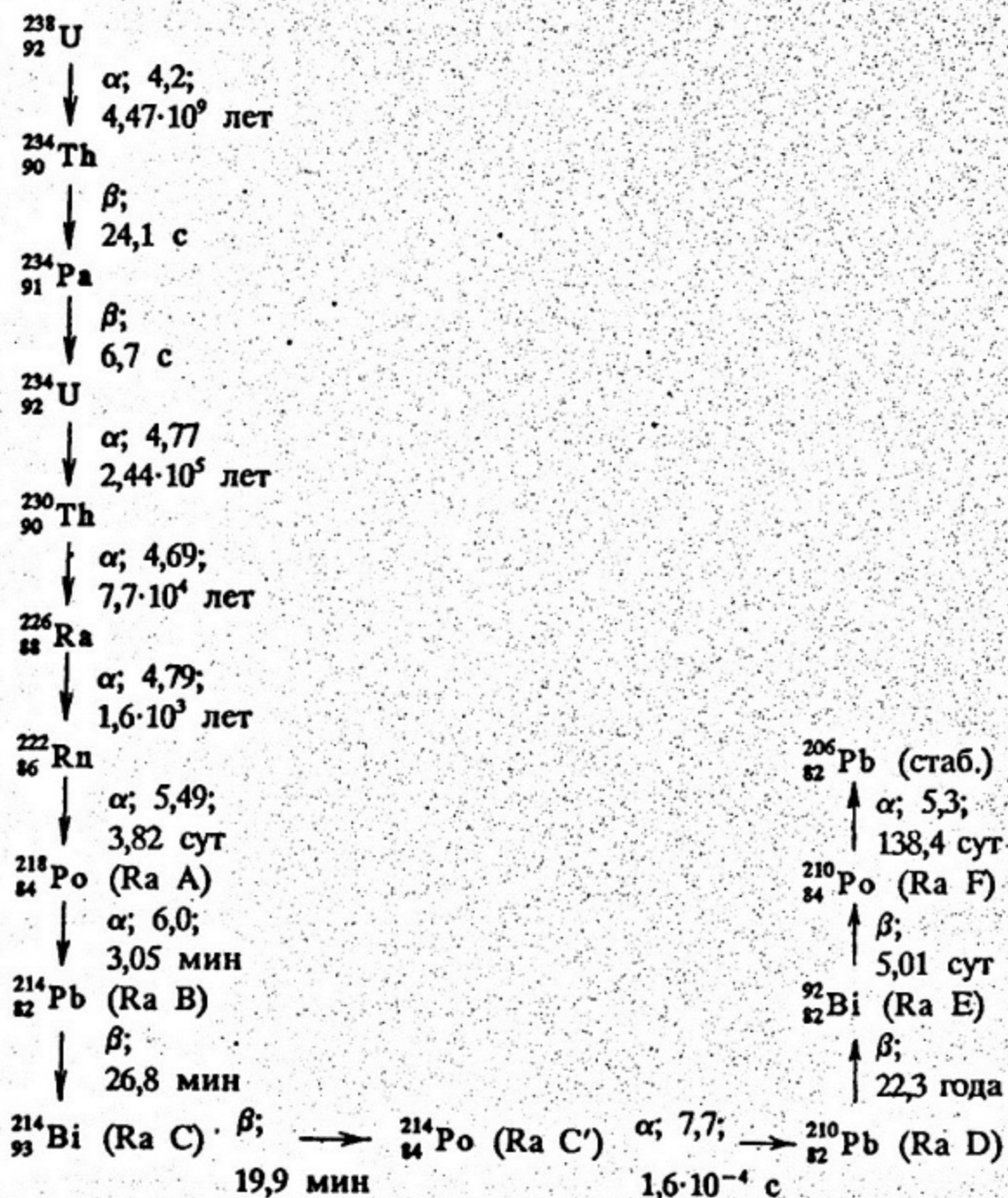
7. ПРОБЕГИ ЭЛЕКТРОНОВ (ЭКСТРАПОЛИРОВАНИЕ) ($\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$)

Энергия, кэВ	Алюминий	Вода	Воздух	Пластик	Сталь
10	0,26	0,216	0,241	0,220	0,275
20	1,12	0,705	0,785	0,722	0,829
50	5,71	3,60	4,00	3,73	3,75
100	18,8	12,2	13,6	12,8	11,7
200	40,3	39,3	43,5	41,5	35,0
500	226	158	175	168	134
1000	555	398	441	425	336
2000	1220	917	1020	978	780
3000	1860	1450	1600	1540	1240

8. СРЕДНИЕ ЭНЕРГИИ ТИПИЧНЫХ БЕТА-ИЗЛУЧАЮЩИХ НУКЛИДОВ

Нуклид	^{14}C	^{32}P	^{90}Sr	^{90}Y	^{137}Cs	^{204}Tl
Энергия, МэВ	0,049	0,695	0,196	0,935	95%—0,173 5%—0,425	0,244
Энергия конверсионных электронов	—	—	—	—	—	0,628

УПРОЩЕННАЯ ЦЕПОЧКА РАСПАДА УРАНА



Примечание: обозначения и цифры у стрелок указывают тип распада, энергию альфа частиц, МэВ, период полураспада

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Наименование	Конструкция, основное назначение	U, В	D _{раб} , мм	L _{раб} , мм	Толщина стенки, мг/см ²
СТС-5	Цилиндрический со стальным катодом для γ - и β -излучений	360-440	10	74	44
СТС-6	Цилиндрический со стальным катодом для γ - и β -излучений	360-440	20	145	50
СИ-13Г	Цилиндрический в стеклянном баллоне для γ -излучений	360-440	9	32	1000
СБТ-7	Торцовый в стеклянном баллоне для γ - и β -излучений	320-420	18	60	3
СБМ-10	Цилиндрический со стальным катодом для γ -излучений	350-450	6	10	40
СБТ-10	Торцовый многоконический для β - и γ -излучений	340-460	55	55	4-6
САТ-7	Торцовый коронный для α -излучений	330-390	24	26	1,3
СИ-9А	Торцовый коронный для α -излучений	330-390	24	30	1,3

2. СЧЕТЧИКИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Наименование	Конструкция	U, В	Площадь рабочей поверхности, см ²	D, мм	L, мм	Чувствительность, имп·см ⁻²	A, мВ	I _{ток} В ₄ C	Обогащение ¹⁰ B, %	Давление, кПа
СНМ-9	Цилиндрический коронный катод, покрытый слоем карбида бора	1300	30	18	130	0,06	5	1 мг/см ²	80	—
СНМ-13	Цилиндрический коронный катод, покрытый слоем карбида бора	500	6	8	95	0,05	20	0,2 мм	80	—
СНМ-20	Цилиндрический пропорциональный со стальным катодом	1500		18	190	—	10	—	80	53
СНМО-5	Цилиндрический пропорциональный	1400		35	185	—	1	—	80	30
СНМ-11	Цилиндрический коронный со стальным катодом	1600	150	18	335	1,2	60	0,2	80	—
СНМ-18	Цилиндрический пропорциональный, наполненный гелием-3	1500		32	55	—	—	—	—	—

3. СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

Сцинтиллятор	Плотность, г/см ³	$Z_{эф}$	Конверс. эффектив- ность, %	Средняя длина вол- ны, нм	$\tau_{изм}$, с
ZnS (Ag)	4,1	27	28	520	10^{-5}
NaI (Tl)	3,67	50	15	410	10^{-6}
LiI (Eu)	4,0	52	1,0	440	10^{-6}
CsI (Tl)	4,51	54	6,0	530	10^{-6}
Стильбен	1,16	5,7	2,8	410	$6 \cdot 10^{-9}$
Пластмассовый	1,02	5,6	2,1	410	$2 \cdot 10^{-9}$

4. ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

Тип	Максимум чувствитель- ности при $\lambda_{опт}$, нм	Чувствительность фотокатода ($\lambda=410$ нм), А/Вт	Р е ж и м напряже- ния, В	Коеффици- ент усиления	Темно- вый ток, А
ФЭУ-13	440	$5,0 \cdot 10^{-2}$	1700	$1,3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-7}$
ФЭУ-29	440	$5,5 \cdot 10^{-2}$	850	$1,4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-9}$
ФЭУ-93	400	$8,0 \cdot 10^{-2}$	1100	$1,3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-9}$
ФЭУ-82	400	$8,0 \cdot 10^{-2}$	1500	$1,3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-9}$

5. КАМЕРЫ

Конструкция и тип	Объем, см ³	Внешний электрод			Внутренний электрод	
		диаметр, см	толщина	материал	диаметр	длина
Цилиндрическая ионизационная ДИГ-5 (АГ) Цилиндрические: АП к прибору ДРГ2-01 к прибору ИДМД-1	5000	17,5	1,5	Алюминий	1,5	28
	1000	8,4	1,5	Алюминий	1,5	18,7
	1000	11,3	1,5	Полиэтилен	0,6	10,0
	0,2	0,54	0,5	Воздухоэквивалентный	0,2	1,0
Бесстеночная	1000	8,4			1,5	18,7
Шаровая к прибору МРМ-2	3000	18,0	1,0	Полиэтилен	4,0	

СОДЕРЖАНИЕ

1. Приборы для измерения ионизирующих излучений и радио- активности	3
2. Детекторы ионизирующих излучений	7
3. Электроника дозиметрических и радиометрических приборов	14
4. Методика вычисления погрешностей измерений	19
5. Задание на разработку приборов	27
6. Пример выполнения работы в лаборатории РДП	31
Приложение 1. Справочные таблицы	37
Приложение 2. Характеристики источников радиоактивного излу- чения	40
Приложение 3. Упрощенная цепочка распада урана	44
Приложение 4. Характеристики детекторов ионизирующего из- лучения	45

31944, 1995, 3500 00, 43СК

НБ МИФИ



BVGQ002U