

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Е. В. Крапивина, Д. В. Иванов, В. В. Семенютин**

**ВЕТЕРИНАРНАЯ РАДИОБИОЛОГИЯ**

**УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Учебное пособие

**БРЯНСКАЯ ОБЛАСТЬ, 2020**

УДК 619:616-001.28/.29 (07)

ББК 53.6

К 78

Крапивина, Е. В. Ветеринарная радиобиология. Устройства для регистрации ионизирующих излучений: учебное пособие / Е. В. Крапивина, Д. В. Иванов, В. В. Семенютин. - Брянск. Изд-во Брянский ГАУ, 2020. - 64 с.

В учебном пособии рассмотрены методы обнаружения и регистрации ионизирующих излучений с помощью детекторов, работающих как на основе первичных эффектов взаимодействия ионизирующих излучений с атомами среды, так и на основе вторичных эффектов. Представлена подробная характеристика детекторов на основе ионизационной камеры, полупроводников, диэлектриков и работающих на основе сцинтилляций. В качестве детекторов, работающих на основе вторичных эффектов взаимодействия ионизирующих излучений с атомами среды, рассмотрены химические, калориметрические и фотографические. Приведены характеристики наиболее распространенных радиометров, дозиметров, спектрометров. Учебное пособие содержит вопросы для самостоятельной проверки знаний.

Учебное пособие предназначено для лабораторно-практических и самостоятельных занятий студентов института ветеринарной медицины и биотехнологии по специальности 36.05.01 – «Ветеринария».

Учебное пособие направлено на формирование у студентов следующих компетенций: ОПК-2, ОПК-4, ОПК-6.

Рецензент: заведующий кафедрой агрохимии, почвоведения и экологии Брянского ГАУ, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Силаев А.Л.

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института ветеринарной медицины и биотехнологии Брянского ГАУ от 16.06.2020 г., протокол №4.

© Брянский ГАУ, 2020

© Крапивина Е. В., 2020

© Иванов Д. В., 2020

© Семенютин В. В., 2020

## Введение

Наша биосфера всю свою историю находилась и находится во взаимодействии с ионизирующими излучениями. Под ионизирующими излучениями понимают поток частиц или квантов электромагнитного излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к ионизации и возбуждению атомов и молекул вещества (радиацией называют потоки частиц или квантов, образующихся при перестройке ядра). К ним относятся потоки электронов, позитронов, протонов,  $\alpha$ -частиц, нейтронов,  $\gamma$ -излучение. Сюда же следует отнести потоки дейтерия, трития и других ионов или частиц – компонентов космического излучения или ускоренных на ускорителях до высоких энергий. Длины волн электромагнитного излучения простираются в широком диапазоне. При этом длины волн ионизирующих излучений (коротковолновых УФ, рентгеновских и гамма-лучей) начинаются примерно с 10 нм с энергией выше 20 кэВ.

Качественный и количественный анализ ионизирующих излучений необходим в различных областях науки и техники: ядерной физике, физике элементарных частиц, радиохимии, технике радиоактивных индикаторов, радиационной химии, радиационном материаловедении, дефектоскопии в сельском хозяйстве, медицине, экологии, геологии, атомной энергетике, в технологиях ядерного топливного цикла, дозиметрии и радиационной безопасности, в практике обитаемых космических полётов. Поэтому методы измерения ионизирующих излучений постоянно и весьма активно развиваются.

При взаимодействии ионизирующих излучений с веществом могут происходить различные физические эффекты: прямая ионизация атомов за счёт взаимодействия их электронных оболочек с заряженными частицами, приводящая к появлению электронно-ионных пар; косвенная ионизация атомов при взаимодействии их электронных оболочек с фотонами за счёт фотоэффекта и Комpton-эффекта, также приводящее к появлению электронно-ионных пар; рождение свободных зарядов (электрон-позитронных пар) при взаимодействии высокоэнергичных фотонов с ядрами атомов; рождение свободных зарядов (ядер отдачи) при упругом и неупругом взаимодействии нейтронов с ядрами атомов; испускание ядрами атомов заряженных частиц (протонов, альфа-частиц, электронов и позитронов) в результате ядерных реакций при взаимодействии их с нейтронами и высокоэнергичными фотонами; возбуждение атомов (молекул), приводящее к излучению фотонов; нагрев вещества за счёт торможения в нём ядерных частиц и поглощения фотонов.

Детектор является главным элементом любой системы, предназначенной для регистрации ионизирующих излучений. Главной функцией детектора яв-

ляется преобразование энергии, выделившейся в результате взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора в сигнал, удобный для регистрации (электрический, визуальный, тепловой). Само активное вещество детектора может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях, что определяет специфические особенности процессов взаимодействия с ионизирующими излучениями.

Методы регистрации радиоактивных излучений могут быть классифицированы по характеру взаимодействия излучения с веществом и по способам их измерения. Заряженные ядерные частицы могут быть обнаружены по их ионизирующему действию. Нейтральные частицы, например, нейтроны и гамма-кванты, непосредственно не производят ионизации, однако, взаимодействуя с ядрами (нейтроны и гамма-кванты) или орбитальными электронами (рентгено- и гамма-кванты), могут вызвать образование вторичных заряженных частиц. Реже используются химические эффекты (диссоциация молекул, инициация определённых химических реакций) в чувствительном элементе регистрирующей системы – детекторе.

## **1. Единицы измерения в дозиметрии**

Необходимость количественной и качественной оценки действия ионизирующего излучения на организм человека и животных, различные вещества живой и неживой природы, проведение контроля радиационной безопасности при работе с излучениями способствовали развитию дозиметрии.

Дозиметрия — раздел ядерной физики и измерительной техники, в котором изучают величины, характеризующие действие ионизирующего излучения на вещества, а также методы и приборы для его качественного и количественного измерения.

Радиометрия — раздел прикладной ядерной физики, который разрабатывает теорию и практику измерения радиоактивности и идентификацию радиоизотопов.

Несмотря на различие задач радиометрии и дозиметрии, базируются они на общих методических принципах обнаружения и регистрации ионизирующих излучений.

Доза излучения и ее мощность. Биологическое действие рентгеновского и ядерных излучений на организм обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул биологической среды. На процесс ионизации излучения растрачивают свою энергию. В результате взаимодействия излучений с биологической средой живому организму передается определенная величина энергии.

Часть поступающего излучения, которая пронизывает облучаемый объект (без поглощения), действия на него не оказывает. Поэтому основная величина, характеризующая действие излучения на организм, находится в прямой зависимости от количества поглощенной энергии. Для измерения количества поглощенной энергии введено понятие «доза излучения» — величина энергии, поглощенной в единице объема (массы) облучаемого вещества.

Различают дозу в воздухе, дозу на поверхности (кожная доза) и в глубине облучаемого объекта (глубинная доза), очаговую и интегральную (общая поглощенная доза) дозы.

Так как поглощенная энергия расходуется на ионизацию среды, то для измерения ее необходимо подсчитать число пар ионов, образующихся при излучении. Однако измерить ионизацию непосредственно в глубине тканей живого организма очень трудно. В связи с этим для количественной характеристики рентгеновского и гамма-излучения, действующего на объект, определяют так называемую экспозиционную дозу ( $D_{\text{ЭКСП}}$ ), которая характеризует ионизирующую способность рентгеновых и гамма-лучей в воздухе. От экспозиционной дозы с помощью соответствующих коэффициентов переходят к дозе, поглощенной в объекте. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию излучения в определенной массе воздуха и только при энергии рентгеновских и гамма-лучей в диапазоне от десятков кэВ до 3 МэВ.

За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят кулон на килограмм (Кл/кг), т.е. такая экспозиционная доза рентгеновских и гамма-лучей, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в килограмме сухого воздуха производит ионы, несущие заряд в один кулон электричества каждого знака.

На практике чаще применяется внесистемная единица — рентген ( $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ ), принятая в 1928 г. Рентген (Р) — экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в  $1 \text{ см}^3$  воздуха (0,001293 г) при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$  и 1013 гПа) создает ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу электричества каждого знака. Заряд одного иона равен заряду электрона, т.е.  $4,8 \cdot 10^{-10}$  эл. ст. ед. Следовательно, число пар ионов при дозе 1 Р будет равно 1 эл. ст. ед.:  $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ эл. ст. ед.} = 2,8 \cdot 10^9$ .

Поскольку на образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается 34 эВ, то энергетический эквивалент рентгена в  $1 \text{ см}^3$  воздуха составляет  $2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ} = 0,114 \text{ эрг/см}^3$ , или в 1 г воздуха 88 эрг ( $0,114 : 0,001293 = 88 \text{ эрг}$ ).

Производные единицы рентгена:

килорентген (кР) ==  $10^3$  Р;  
миллирентген (мР) =  $10^{-3}$  Р,  
микрорентген (мкР) =  $10^{-6}$  Р.

Для корпускулярного излучения была предложена единица фЭР (физический эквивалент рентгена), однако она не получила практического применения. В последующем стало очевидно, что единица рентген не может обеспечить решение всех метрологических и практических задач в радиологии. Помимо нее, необходима универсальная (для любого вида ионизирующего излучения) единица, применяемая для определения физического эффекта облучения в любой среде, в частности в биологических тканях. Такой единицей стал рад — внесистемная международная единица поглощенной дозы, которая рекомендована Международным конгрессом радиологов в 1953 г. и получила широкое применение в практике.

Единица рад (rad — radiation absorbet dose) — поглощенная доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в 1 г массы вещества поглощается энергия излучения, равная 100 эрг ( $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$ ).

Производные единицы рад:

килорад (крад) =  $10^3$  рад,  
миллирад (мрад) =  $10^{-3}$  рад,  
микрорад (мкрад) =  $10^{-6}$  рад.

За единицу поглощенной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят джоуль на килограмм (Дж/кг), т.е. такая поглощенная доза, при которой в 1 кг массы облученного вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Этой единице присвоено собственное наименование грей (Гр);  $\text{Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ .

Введение единицы рад не исключает использование единицы измерения излучения в рентгенах, тем более, что большая часть дозиметрической аппаратуры пока отградуирована в рентгенах. Единицей рентген пользуются для измерения поля излучения (или, как говорят радиологи, падающего излучения), для количественной характеристики источников квантового излучения.

Поскольку при одной и той же энергии  $\gamma$ -квантов и частиц в 1 г разной по химическому составу биологической ткани поглощается различное количество энергии, поглощенную в тканях дозу измеряют в радах расчетным путем по формуле:

$$\text{Дп (рад)} = \text{Дэксп (Р)} \cdot f$$

где Дп (рад) — поглощенная доза в радах; Дэксп (Р) — экспозиционная доза в рентгенах в той же точке;  $f$  — переходный коэффициент, величина которого зависит от энергии излучения и от рода поглощающей ткани (атомного номера и плотности).

Если в воздухе доза излучения в 1 Р энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощенная энергия для этой среды составит  $88: 100=0,88$  рад. Таким образом, для воздуха поглощенная доза, равная 0,88 рад, соответствует экспозиционной дозе в 1 Р.

Переходный коэффициент  $f$  обычно определяют опытным путем на фантоме. Для воды и мягких тканей коэффициент  $f_{\text{тк}}$  округленно принят за единицу (фактически он составляет 0,93). Следовательно, поглощенная доза в радах численно почти равна соответствующей экспозиционной дозе в рентгенах. Для костной ткани коэффициент  $f_{\text{к}} = 2 — 5$ .

В биологическом отношении важно знать не просто дозу излучения, которую получил облучаемый объект, а дозу, полученную в единицу времени. В одном случае суммарная доза, значительно превышающая смертельную, но полученная в течение длительного периода времени, не только не приведет к гибели животного, но даже не вызовет у него реакцию лучевого поражения. В другом случае, доза меньше смертельной, но полученная в короткий отрезок времени может вызвать лучевую болезнь различной тяжести. В этой связи введено понятие мощности дозы. Мощность дозы ( $P$ ) это доза излучения  $D$ , отнесенная к единице времени  $t$ :

$$D = P \cdot t, P = D/t$$

Чем больше мощность дозы  $P$ , тем быстрее растет доза излучения  $D$ .

Понятие мощности дозы относится как к экспозиционной, так и к поглощенной дозе. Для экспозиционной дозы системная единица — ампер на килограмм (А/кг), внесистемная — рентген в час (Р/ч) или рентген в минуту (Р/мин) и т. д.; для поглощенной дозы соответственно — ватт на килограмм (Вт/кг) и рад в час (рад/ч), рад в минуту (рад/мин) и т. д.

Установлено, что биологическое действие одинаковых доз различного вида излучения на организм неодинаково. Это связано с удельной ионизацией излучения. Чем выше удельная ионизация, тем больше коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ), или коэффициент качества (КК), или взвешивающий радиационный коэффициент (ВРК). Эти коэффициенты показывают, во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше, чем рентгеновского или гамма-излучения при одинаковой поглощенной дозе в тканях.

Для оценки биологического действия излучения введено понятие - биологический эквивалент рентгена (бэР).

Единица бэР — это доза любого ионизирующего излучения, при которой в биологической среде создается такой же биологический эффект, как при дозе

рентгеновского или гамма-излучения в 1 Р. В системе СИ для оценки биологического действия излучения используется - 1 Зиверт (1 Зв = 100 бэр).

### **Контрольные вопросы:**

1. Что изучают «дозиметрия» и «радиометрия»?
2. Чем обусловлено биологическое действие рентгеновского и ядерных излучений на организм?
3. Что принято за единицу экспозиционной дозы?
4. Что принято за единицу поглощенной дозы?
5. Что означает «мощность дозы»?
6. Как связаны между собой понятия «удельная ионизация», «коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ)», «коэффициент качества (КК)», «взвешивающий радиационный коэффициент (ВРК)»?
7. Что показывает единица «бэр» и как она связана с «Зивертом»?

## **2. Методы обнаружения и регистрации ионизирующих излучений**

### **2.1. Детекторы на основе первичных эффектов взаимодействия ионизирующих излучений с атомами среды**

#### **Детекторы на основе ионизационной камеры**

Радиоактивные излучения не воспринимаются органами чувств. Эти излучения могут быть обнаружены (детектированы) при помощи приборов и приспособлений, работа которых основана на физических или химических эффектах, возникающих при взаимодействии излучений с веществом.

В радиометрической практике наиболее широко применяются простые и надёжные детекторы излучения, позволяющие использовать электрические схемы регистрации. Для получения необходимой информации о составе и характеристиках ионизирующего излучения, его преобразуют чаще всего с помощью соответствующих приборов в электрические сигналы, которые затем измеряют, сортируют и регистрируют радиометрической аппаратурой.

Существуют два метода измерения излучений ионизационными детекторами. Первый состоит в измерении среднего значения постоянного тока интегрирующей ионизационной камеры посредством электрометрического усилителя. Этот метод наиболее простой. Второй метод заключается в счёте числа

импульсов, вырабатываемых соответствующим детектором под действием излучения. Этот метод намного более чувствителен. Кроме того, рабочий сигнал импульсных камер, пропорциональных и сцинтилляционных счётчиков содержит информацию двух видов: число импульсов говорит об интенсивности радиации, амплитуда импульсов – об энергии частиц. Амплитуда импульсов измеряется посредством многоканальных анализаторов. Развитие импульсных ускорителей частиц привело к разработке специальных быстродействующих счётных установок. Необходимость детального изучения ядерных процессов потребовало создание координатных детекторов.

В практике наиболее употребительны ионизационные детекторы излучений, которые измеряют непосредственные эффекты взаимодействия излучения с веществом.

Другие методы предусматривают измерение вторичных эффектов, обусловленных ионизацией, — фотографический, люминесцентный, химический, калориметрический и другие.

*Ионизационные детекторы излучения* представляют собой заполненную воздухом или газом камеру с электродами для создания в ней соответствующего электрического поля (рис. 1).

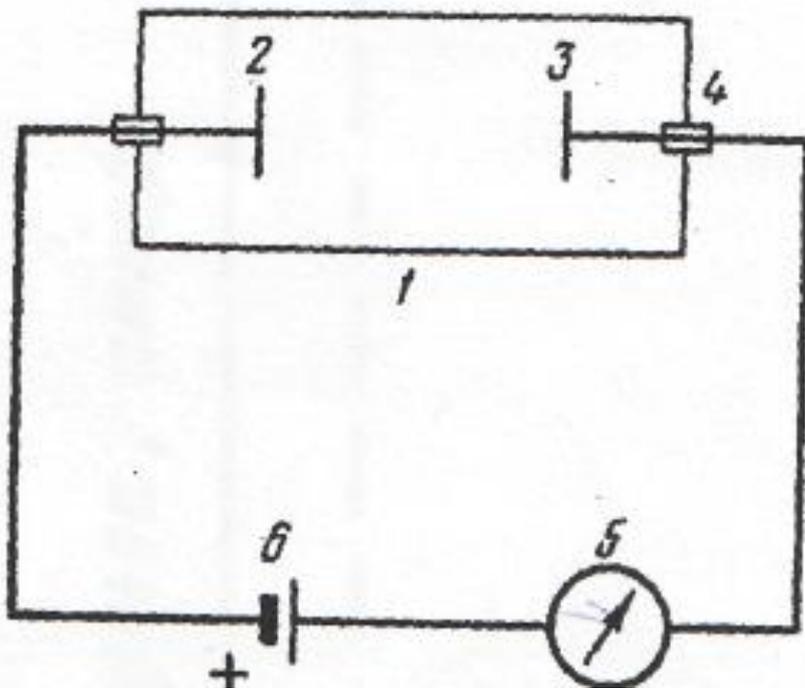


Рис. 1. Схема работы ионизационной камеры:

1 — камера, заполненная воздухом или газом; 2 — анод; 3 — катод; 4 — изолятор; 5 — прибор для измерения ионизационного тока камеры (амперметр); 6 — источник питания.

Заряженные частицы ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), попавшие в камеру детектора, производят в ней непосредственно первичную ионизацию газовой среды;  $\gamma$ -кванты сначала образуют быстрые электроны (фотоэлектроны, комптонэлектроны, электронно-позитронные пары) в стенке детектора, которые затем вызывают ионизацию газовой среды в нем.

Сухой газ (воздух) — хороший электроизолятор, так как электрически нейтральные молекулы, из которых он состоит, не перемещают электрические заряды. Положение изменяется, если в газовую среду попадают заряженные частицы. Они образуют ионные пары, и газ (воздух) становится проводником электрического тока.

При отсутствии напряжения на электродах все ионы, созданные начальной ионизацией, полностью рекомбинируют в нейтральные молекулы. При возрастании напряжения ионы под действием электрического поля обретают направленное движение: положительные ионы собираются на катоде, а электроны — на аноде. В цепи возникает ионизационный ток, который может быть зарегистрирован прибором. Величина ионизационного тока служит мерой количества излучения.

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие методы измерения излучений ионизационными детекторами существуют?
2. Что измеряют ионизационные детекторы излучений?
3. Объясните принцип работы ионизационной камеры.
4. Что служит мерой количества излучения в ионизационной камере?

#### **2.1.1. Вольт-амперная характеристика ионизационного детектора**

С увеличением напряжения вероятность рекомбинации уменьшается, а, следовательно, возрастает сила ионизационного тока. На рисунке 2 показана кривая зависимости силы ионизированного тока ( $I$ ) от напряжения ( $V$ ), приложенного к электродам детектора. Эта кривая называется вольт-амперной характеристикой ионизационного детектора (рис. 2).

Начиная с некоторого напряжения ( $V_n$ ), наступает момент, когда все ионы, образованные излучением, доходят до электродов и при увеличении напряжения ионизационный ток не возрастает. Область, обозначенная на графике  $V_n$  —  $V_n$ , в которой сила ионизационного тока остается постоянной, называется областью тока насыщения. В этом режиме работают ионизационные камеры.

Сила ионизационного тока в области тока насыщения зависит от величин-

ны первичной ионизации, т. е. от числа первичных пар ионов, создаваемых ядерным излучением в камере детектора. Поэтому ионизационный ток от гамма-излучения меньше, чем от  $\beta$ -частиц; более высокий он от  $\alpha$ -частиц, так как плотность ионизации у альфа-излучения на 2-3 порядка больше, чем у двух первых.

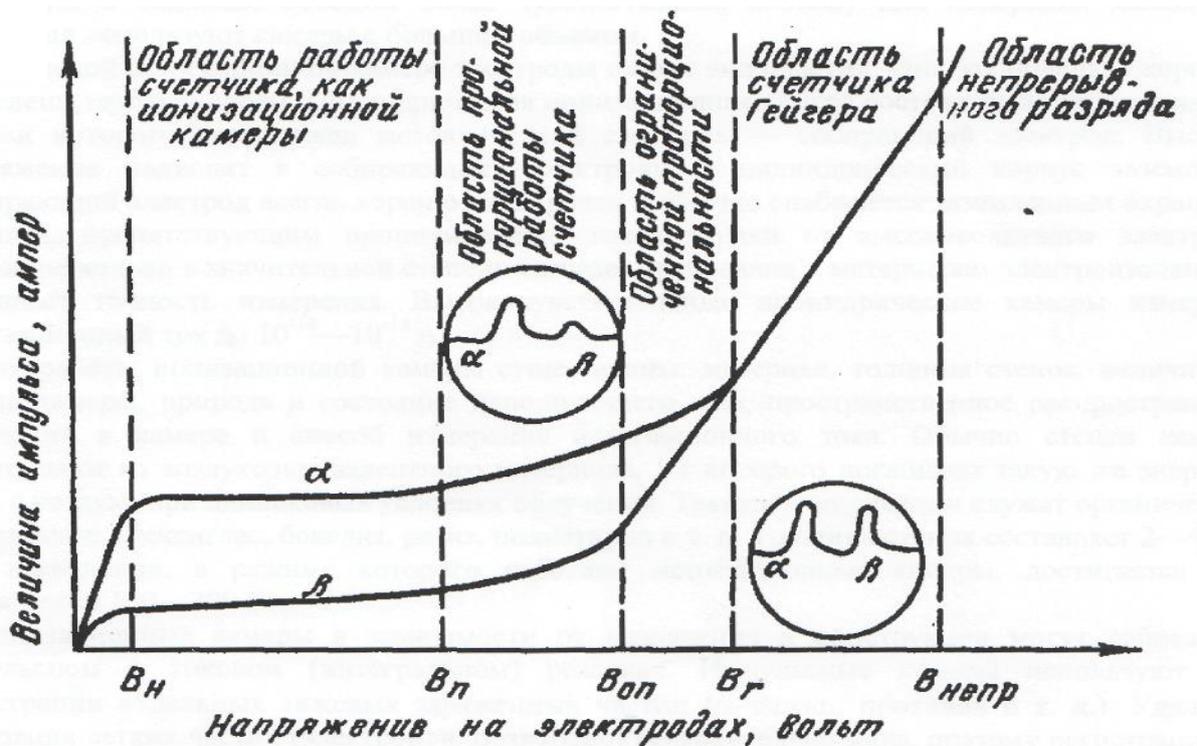


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ионизационной камеры

При дальнейшем увеличении напряжения  $V_n$  —  $V_{оп}$  сила ионизационного тока опять начинает возрастать, поскольку ионы, образованные излучением, приобретают при движении к электродам (особенно электроны) ускорения, достаточные для того, чтобы самим производить ионизацию и вследствие соударений с атомами и молекулами газовой среды детектора (газовое усиление). Этот процесс называется ударной (вторичной) ионизацией. Чем больше напряжение, тем большую энергию приобретают ионы и, следовательно, тем больше пар ионов они создают в процессе ударной ионизации.

В области напряжений  $V_n$  —  $V_{оп}$  существует строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и общей суммой ионов, участвующих в создании ионизационного тока. Эта область напряжений называется областью пропорциональности. В этом режиме работают пропорциональные счетчики.

Коэффициент газового усиления ( $K_{г\upsilon}$ ) в режиме пропорциональности может достигать  $10^3$ — $10^4$  (Коэффициент газового усиления — это отношение общей суммы ионов ( $n$ ), участвующих в создании ионизационного тока, к числу первично образованных ионов ( $n_0$ ):  $K_{г\upsilon} = n/n_0$ ).

При дальнейшем увеличении напряжения  $V_{on}$  —  $V_r$  строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и силой ионизационного тока нарушается. Поэтому данная область получила название ограниченной пропорциональности.

При еще больших значениях напряжения сила ионизационного тока уже не зависит от числа первично образованных ионов. Газовое усиление настолько возрастает ( $K_{г\gamma} \approx 10^8$ — $10^{10}$ ), что при появлении в камере детектора хотя бы одной любой ядерной частицы любой энергии происходит вспышка самостоятельного газового разряда, который охватывает всю камеру детектора. Область напряжений  $V_r$  —  $V_{непр}$ , при которых в детекторе возникает самостоятельный разряд, называется областью Гейгера. В этом режиме работают счетчики Гейгера—Мюллера.

Если продолжать увеличивать напряжение (выше значения  $V_{непр}$ ), то детектор перейдет в область постоянного коронного разряда — непрерывного разряда, который не прекращается при удалении источника ионизирующего излучения. В этом режиме детектор выходит из строя. Это положение необходимо учитывать при работе с газоразрядными счетчиками.

### **2.1.2. Счётчики, работающие в области плато ионизационной камеры**

*Ионизационная камера* — один из распространенных детекторов излучения. Ее применяют для измерения всех типов ядерных излучений. По конструктивному оформлению ионизационные камеры могут быть плоские, цилиндрические и сферические с объемом воздуха 0,5—5 л. Есть миниатюрные ионизационные камеры — наперстковые, смонтированные в футляре, по форме похожие на авторучку. Их используют как индивидуальные дозиметры (ДК-0,2, КИД-1 и КИД-2, ДП-22В, ДП-24 и др.). Воздушный объем таких камер колеблется от нескольких кубических сантиметров до их долей.

Камеры с большим объемом более чувствительны, поэтому для измерения малых доз излучения используют камеры с большим объемом.

В плоской ионизационной камере электроды имеют вид пластин. Они заключены в корпус и разделены газовым слоем. Цилиндрическая ионизационная камера состоит из полого цилиндра, по оси которого расположен металлический стержень — собирающий электрод. Высокое напряжение подводят к собирающему электроду, а цилиндрический корпус заземляют. Собирающий электрод всегда хорошо изолирован и обычно снабжается заземленным охранным кольцом, препятствующим проникновению токов утечки от высоковольтного электрода. Охранное кольцо в значительной степени снижает требования к материалам электроизоляции и повышает точность измерения. Высокочувствительные цилиндрические камеры измеряют ионизационный ток до  $10^{-14}$  —  $10^{-15}$  А.

Для работы ионизационной камеры существенны: материал, толщина стенок, величина и форма камеры, природа и состояние наполняющего газа, пространственное распространение излучения в камере и способ измерения ионизационного тока. Обычно стенки камеры изготавливают из воздухоэквивалентного материала, 1 г которого поглощает такую же энергию, как 1 г воздуха при одинаковых условиях облучения. Такими материалами служат органические пластмассы: плексиглас, бакелит, резит, полистерол и другие синтетические материалы. Толщина стенок составляет 2 - 4 мм. Ток насыщения, в режиме которого работают ионизационные камеры, достигается при напряжении 150—300 В.

Ионизационные камеры и зависимости от назначения и конструкции могут работать и импульсном и токовом (интегральном) режимах. Импульсные камеры попользуют для регистрации отдельных тяжелых заряженных частиц ( $\alpha$ -частиц, протонов). Удельная ионизация легких частиц (электронов, позитронов) сравнительно мала, поэтому регистрация их в импульсном режиме неэффективна. Токковые камеры применяют для измерения интенсивности всех типов излучения, которые пропорциональны среднему току, проходящему через камеру. Поскольку величина ионизационного тока пропорциональна энергии излучения, то ионизационные камеры измеряют ток насыщения в единицу времени, т. е. мощность дозы данного излучения. Поэтому они могут быть градуированы в единицах мощности дозы. Следовательно, ионизационные камеры могут быть использованы не только для измерения дозы излучения, но и ее мощности.

Более подробно характеристики ионизационных камер изложены в технических инструкциях по их эксплуатации.

### **2.1.3. Счётчики, работающие в области пропорциональности**

*Пропорциональные счетчики* выгодно отличаются от ионизационной камеры тем, что начальное усиление первичной ионизации происходит внутри самого счетчика ( $K_{\text{гу}}=10^3 — 10^4$ ). Использование газового усиления в пропорциональных счетчиках дает возможность значительно повысить чувствительность измерений и упростить схему усиления сигнала по сравнению с ионизационными камерами. Наличие пропорциональности усиления в счетчиках позволяет определить энергию ядерных частиц и изучать их природу.

Обычно пропорциональный счетчик делают в виде цилиндра, вдоль оси которого натягивают металлическую нить — анод (рис. 3). Проводящее покрытие внутренней поверхности цилиндра служит катодом. При таком устройстве все электрическое поле сосредоточивается около нити и его максимальное значение оказывается тем выше, чем меньше радиус нити. Поэтому необходимые для газового усиления большие напряженности полей удается получить при

сравнительно небольших разностях потенциалов между корпусом счетчика и нитью. В электрическую цепь пропорциональный счетчик включают так же, как ионизационную камеру.

Пропорциональные счетчики изготавливают и торцового типа, например, счетчик  $\alpha$ -частиц торцовый. Чтобы обеспечить проникновение в полость счетчика  $\alpha$ -частиц, входное слюдяное окно делают очень тонким (4 — 10 мкм). Наполняют счетчик смесью неона с аргоном почти до уровня атмосферного давления. Есть счетчики открытые, рабочая полость которых сообщается с внешним воздухом. Такие счетчики работают при атмосферном давлении, они допускают непрерывное протекание или циркуляцию наполняющего их газа и поэтому их часто используют для регистрации активности газовых проб.

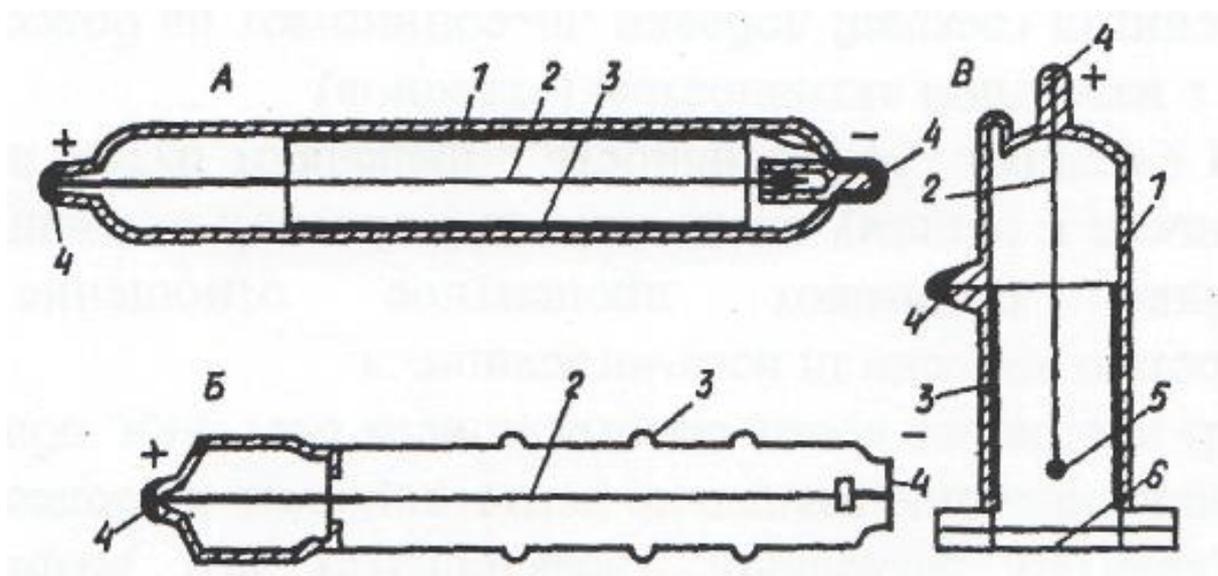


Рис. 3. Схема устройства газоразрядных счетчиков: А — цилиндрический со стеклянными стенками для регистрации  $\gamma$ -излучения; Б - цилиндрический с металлическими стенками для регистрации жесткого  $\beta$ -излучения, В — торцовый счетчик; 1 — стеклянный баллон; 2 — анод (вольфрамовая нить); 3 — катод (металлический цилиндр); 4 — колпачки выводов; 5 — стеклянная бусинка; 6 — тонкое слюдяное окно.

В целях повышения эффективности регистрации излучений пропорциональные счетчики иногда делают в виде плоских многонитных детекторов. Такого типа счетчики применялись в одном из датчиков радиометра ТИСС. Пропорциональные счетчики в большинстве случаев используются для регистрации  $\alpha$ -частиц.

#### 2.1.4. Счётчики, работающие в области Гейгера — Мюллера

*Счетчики Гейгера — Мюллера* (газоразрядные счетчики) конструктивно мало чем отличаются от пропорциональных счетчиков цилиндрического и торцового типа (рис. 3). Основное отличие его состоит в том, что внутренний объём счётчика Гейгера наполнен инертным газом при пониженном давлении (15—75 гПа), а работа осуществляется в области Гейгера, т. е. в режиме самостоятельного газового разряда.

Механизм газового разряда в счетчиках несамогасящихся и самогасящихся следующий. При попадании ядерной частицы в счетчик происходит первичная ионизация газовой среды. Образовавшиеся положительные ионы движутся к катоду - к стенке счетчика, а электроны - к аноду, к нити. Малая площадь анода по сравнению с поверхностью катода создает в области нити большую плотность силовых линий, поэтому здесь напряженность электрического поля достигает величин области Гейгера (рис. 4).

Под влиянием высокой разности потенциалов между электродами и пониженного давления в счетчике электроны, движущиеся к центральному электроду (аноду), приобретают большие ускорения и производят ударную вторичную ионизацию. Новые ионы, в свою очередь, приобретают скорость, при которой они способны вызвать ионизацию. Одновременно с ударной ионизацией дополнительным источником электронов становятся образовавшиеся положительные ионы.

Двигаясь с большим ускорением к катоду, они выбивают из стенки счетчика значительно больше электронов, чем необходимо для нейтрализации положительных ионов. Эти электроны еще более увеличивают лавинный эффект. Кроме того, в результате соударений атомов и молекул газовой среды с быстро движущимися ионами происходит возбуждение атомов и молекул, которое сопровождается испусканием ультрафиолетового излучения, способного также вызвать ионизацию. Эффект первоначальной единичной ионизации увеличивается во много раз, в результате чего весь чувствительный объем счетчика охватывает разрядом. Коэффициент газового усиления может достигать  $10^8 - 10^{10}$ .

Если во время быстро нарастающей вторичной ионизации в счетчик проникнет следующая ядерная частица, то она не будет зарегистрирована счетной установкой, поскольку произведенная ею ионизация уже не изменит имеющуюся картину. Для обнаружения второй ядерной частицы необходимо «погасить» процесс ионизации от первой, что достигается либо включением в электрическую цепь высокого сопротивления (у несамогасящихся счетчиков), либо введением в счетчик органических паров (самогасящиеся счетчики).

Обычно применяют пары многоатомных спиртов в соотношении 90% аргона и 10% паров спирта. Органическая добавка (гасящий компонент) обеспечивает нейтрализацию положительных ионов аргона путем отдачи слабосвязанных электронов, а также поглощение квантов ультрафиолетового излучения, выбивающих из стенок счетчика электроны.

Таким образом, молекулы многоатомного газа (спирта) приостанавливают вторичную ионизацию («гасят» разряды), и счетчик становится готовым к регистрации следующей частицы.

Время, в течение которого счетчик не может зарегистрировать попавшую в него частицу (квант), называется мертвым временем счетчика. Мертвое время самогасящихся счетчиков составляет  $10^{-4}$  с.

Время, в продолжение которого счетчик способен регистрировать частицы (кванты) отдельно, характеризует его разрешающую способность. Несамогасящиеся счетчики способны отдельно регистрировать не более  $10^2 - 10^3$  имп/с, самогасящиеся - до  $10^4$  имп/с. В настоящее время самогасящиеся счетчики, обладающие высокой эффективностью счета, полностью вытеснили несамогасящиеся.

Под эффективностью счётчика понимают процентное отношение числа зарегистрированных счетчиком импульсов к общему числу частиц (квантов), попавших за тот же отрезок времени в рабочий объем счетчика. Эффективность определяют путем измерения излучения радиоактивных препаратов с известной активностью (эталонных).



Рис. 4. Поперечное сечение счетной трубки с изображением расположения силовых линий

В процессе работы счетчика пары спирта гасящей добавки диссоциируют на более простые радикалы. Это приводит к изменению состава рабочей газовой смеси и ухудшению ее гасящих свойств. Поэтому счетчик со временем выходит из строя. Обычно это случается после регистрации  $10^8 - 10^9$  ядерных частиц. Чтобы про-

длитель срок работы счётчика не следует подавать излишне высокие напряжения. Для этого необходимо перед началом работы снять счетную характеристику и определить рабочее напряжение счетчика.

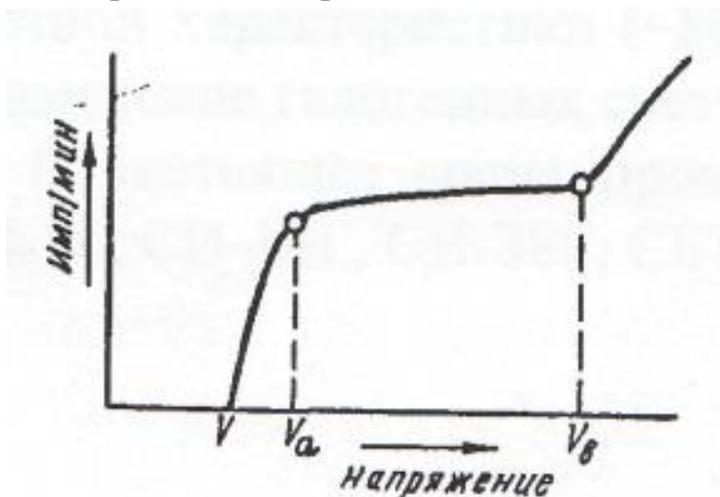


Рис. 5. Счетная характеристика счетчика Гейгера — Мюллера:  
 $V$  —  $V_a$  — начало счета;  $V_a$  —  $V_b$  — плато счетчика

Счётная характеристика выражает зависимость скорости счета (числа имп/мин) от напряжения, приложенного к счетчику. Область напряжений, в которой устанавливается постоянство скорости счета в единицу времени, получила название «плато счетчика» (рис. 5). Чем больше протяженность и меньше наклон плато, тем лучше счетчик. В самогасящихся счетчиках протяженность плато достигает 200—300 В, наклон плато - 3 - 5% для торцовых и 12 - 15% для цилиндрических счетчиков на каждые 100 В. Рабочее напряжение обычно выбирают на расстоянии  $1/3$  от начала плато.

Счетчики Гейгера - Мюллера применяются для регистрации всех видов излучений, но чаще для бета-и гамма-излучений. Конструкция счетчиков определяется теми задачами, которые они призваны решать. Для счета  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц малых энергий — 0,1 — 0,2 МэВ — применяются торцовые счетчики типов с тонким входным окном (1—5 мг/см<sup>2</sup>). Эти счетчики могут регистрировать и жесткое бета-излучение.

Для обнаружения бета-излучений средней и большой энергии используют цилиндрические счетчики типов, имеющие стенки из нержавеющей стали и алюминия, толщиной 40—45 мг/см<sup>2</sup>.

Счетчики для регистрации гамма-излучения имеют некоторую особенность в конструкции. Регистрация гамма-излучения возможна в результате выбивания вторичных электронов из катода счетчика на основе известных трех механизмов взаимодействия этого излучения с веществом: фотоэффекта, комптонэффекта, образования электронно-позитронных пар. Вторичные электроны

(фотоэлектроны, комптонэлектроны, электронно-позитронные пары), попадая в чувствительный объем счетчика, вызывают газовый разряд (ударную ионизацию), который и регистрируется радиометрическим устройством. В силу того что  $\gamma$ -кванты слабо поглощаются веществом, эффективность гамма-счетчиков очень мала и не превышает 1%. Для повышения эффективности счета  $\gamma$ -квантов стенки гамма-счетчиков делают из материалов с большим атомным номером и более толстыми (с учетом величины максимального пробега вторичных электронов в данном веществе). Промышленные гамма-счетчики, как правило, цилиндрические и имеют стеклянные стенки. Катодом у них служит напыленный на внутреннюю поверхность стекла слой графита, меди, никеля или вольфрама. Наполнитель—смесь аргона и паров спирта. В практической работе применяют счетчики, длина и диаметр которых варьируют в широких пределах — от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Отдельную группу составляют так называемые галогенные счетчики, у которых в качестве гасящего компонента применяют галоиды. Добавка незначительного количества ( $\sim 0,1\%$ ) таких двухатомных газов, как  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ , к неону или аргону резко снижает начальный потенциал «зажигания» самостоятельного разряда и делает эти счетчики самогасящимися. Объяснить гасящее действие галогенов, очевидно, можно следующим образом. Под действием ионизирующих частиц, поступающих в счетчик, атомы неона приходят в возбужденное состояние. При переходе атомов неона в основное состояние энергия, излучаемая ими, затрачивается больше на ионизацию галогена и меньше на ионизацию аргона. Положительные ионы аргона нейтрализуются, приобретая электроны при столкновении с ионами и молекулами галогена. Небольшое рабочее напряжение (300-400 В) на электродах счетчика приводит к уменьшению вероятности вырывания электронов (являющихся источниками новых лавин ионов) из катода при подходе к нему положительных ионов. При рекомбинации на катоде молекулы галогенов диссоциируют на атомы, которые через некоторое время вновь образуют молекулы.

В результате всех процессов состав смеси не изменяется и галогенные счетчики могут работать неограниченное время. Кроме того, такие счетчики имеют небольшое рабочее напряжение – 300-400 В (для обычных счетчиков необходимое напряжение составляет 700-1600 В), не боятся перегрузок, имеют сравнительно высокую скорость счёта. Однако галогенные счетчики имеют и существенный недостаток — короткое плато счетной характеристики ( $\sim 80$  В) с большим наклоном (12—15% на 100 В). Это ограничивает применение галогенных счетчиков для точных измерений радиоактивных образцов.

Низкое рабочее напряжение (300—400 В) позволяет применять галогенные счетчики для измерений в нестационарных полевых условиях. В качестве источника питания можно использовать сухие батареи.

Промышленность выпускала несколько типов галогенных счетчиков: СИ-1Г, СИ-1БГ, СИ-3БГ, СБТ и др. Они использовались в измерителе мощности дозы ДП - 5. Измерители мощности дозы ДП-5А (Б) и ДП-5В предназначались для измерения уровней радиации на местности и радиоактивной зараженности различных предметов по гамма-излучению. Кроме того, они могли обнаруживать бета излучения. Диапазон измерений по гамма-излучению от 0,05 мР/ч до 200 Р/ч в диапазоне энергий гамма квантов от 0,084 до 1,25 Мэв. Прибор состоял: из измерительного пульта; зонда в ДП-5А (Б) или блока детектирования в ДП-5В, контрольного стронциево - иттриевого источника бета излучений для проверки работоспособности приборов (с внутренней стороны крышки футляра у ДП-5А(Б) и на блоке детектирования у ДП-5В).

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называется вольтамперной характеристикой ионизационного детектора?
2. Как изменяется с увеличением напряжения вероятность рекомбинации ионов в ионизационной камере?
3. От чего зависит сила ионизационного тока в области тока насыщения?
4. От чего зависит сила ионизационного тока в области пропорциональности?
5. Что показывает коэффициент газового усиления?
6. От чего зависит сила ионизационного тока в области Гейгера?
7. Какие могут быть по конструктивному оформлению ионизационные камеры?
8. Как используют наперстковые, смонтированные в футляре, по форме похожие на авторучку ионизационные камеры?
9. В чём состоит конструктивное отличие плоской от цилиндрической ионизационной камеры?
10. Какие материалы считают воздухоэквивалентными?
11. Для регистрации каких частиц используют импульсные ионизационные камеры?
12. Как устроен пропорциональный счетчик?
13. В чем состоит конструктивная особенность пропорциональных счетчиков предназначенных для регистрации  $\alpha$ -частиц?
14. В чем состоит конструктивная особенность счетчиков Гейгера — Мюллера?

15. За счёт каких процессов происходит вторичная ударная ионизация?
16. Что называется мёртвым временем счётчика?
17. В чём отличие самогасящих счётчиков от несамогасящих?
18. Что называется разрешающей способностью счётчика?
19. Что понимают под эффективностью счётчика?
20. Что выражает счётная характеристика счётчика?
21. В чём состоит преимущество галогенных счетчиков?

## **2.2. Детекторы на основе сцинтилляций (люминесцентные методы регистрации излучений)**

Сцинтилляционные детекторы основаны на регистрации люминесценции, вызываемой действием излучения на люминофоры, в которых энергия излучения преобразуется в световые вспышки (сцинтилляции). Люминофоры, используемые для этих целей, обычно называются сцинтилляторами.

Процессы люминесценции (высвечивания) фосфора делят на два вида: флуоресценции и фосфоресценции. Если высвечивание происходит непосредственно во время возбуждения или в течение промежутка времени порядка  $10^{-8}$  сек, то процесс называется флуоресценцией. Под фосфоресценцией понимают люминесценцию, которая продолжается значительное время после прекращения возбуждения.

В качестве сцинтилляторов используются различные вещества (твёрдые, жидкие, газообразные). Сцинтиллятор может быть органическим (кристаллы, пластики или жидкости) или неорганическим (кристаллы или стекла).

Сцинтилляционный счетчик представляет собой сочетание сцинтиллятора (фосфора) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В комплект счетчика входят также источник электрического питания ФЭУ и радиотехническая аппаратура, обеспечивающая усиление и регистрацию импульсов ФЭУ. Иногда сочетание фосфора с ФЭУ производится через специальную оптическую систему (светопровод). Принцип действия сцинтилляционного счётчика состоит в следующем: заряженная частица или квант, проходя через сцинтиллятор, наряду с ионизацией атомов и молекул возбуждает их. Возвращаясь в невозбуждённое (основное) состояние, атомы испускают фотоны. Излученный свет собирается – в спектральном диапазоне сцинтиллятора – на фотоприёмник. В качестве последнего часто служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Фотоэлектронный умножитель представляет собой стеклянный цилиндр, откаченный до остаточного давления не выше  $10^{-6}$  мм рт. ст., в торце которого расположено прозрачное плоское окно, на поверхность которого со стороны эвакуируемого объ-

ёма нанесён тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов (фотокатод), обычно на основе сурьмы и цезия. Фотоны, попадая на фотокатод ФЭУ, в результате фотоэффекта выбивают электроны, в результате чего на аноде ФЭУ возникает электрический импульс, который далее усиливается диодной системы за счёт механизма вторичной электронной эмиссии. В вакуированном пространстве располагается серия электродов – динодов (рис. 6), на которые с помощью делителя напряжения от источника электропитания подаётся последовательно возрастающая разность потенциалов. Диноды ФЭУ изготавливаются из вещества также с малой работой выхода электронов (покрытых сурьмяно-цезиевой смесью, либо изготовленных из специальных сплавов алюминия, магния и серы). Они способны при бомбардировке их электронами испускать вторичные электроны в количествах, превышающих число первичных в несколько раз. Последний динод является анодом ФЭУ. Основным параметром ФЭУ является коэффициент усиления при определённом режиме питания. Обычно ФЭУ содержит девять и более динодов и усиление первичного тока достигает для различных умножителей величин  $10^5 - 10^{10}$  раз, что позволяет получать электрические сигналы амплитудой от вольт до десятков вольт. Анодный ток ФЭУ – через усилитель или непосредственно - подается на вход измерительного прибора – счетчика импульсов, осциллографа или аналогоцифрового преобразователя. Таким образом, лавина электронов возрастает от катода к аноду; происходит преобразование очень слабых световых вспышек, возникающих в сцинтилляторе, в регистрируемые электрические импульсы.

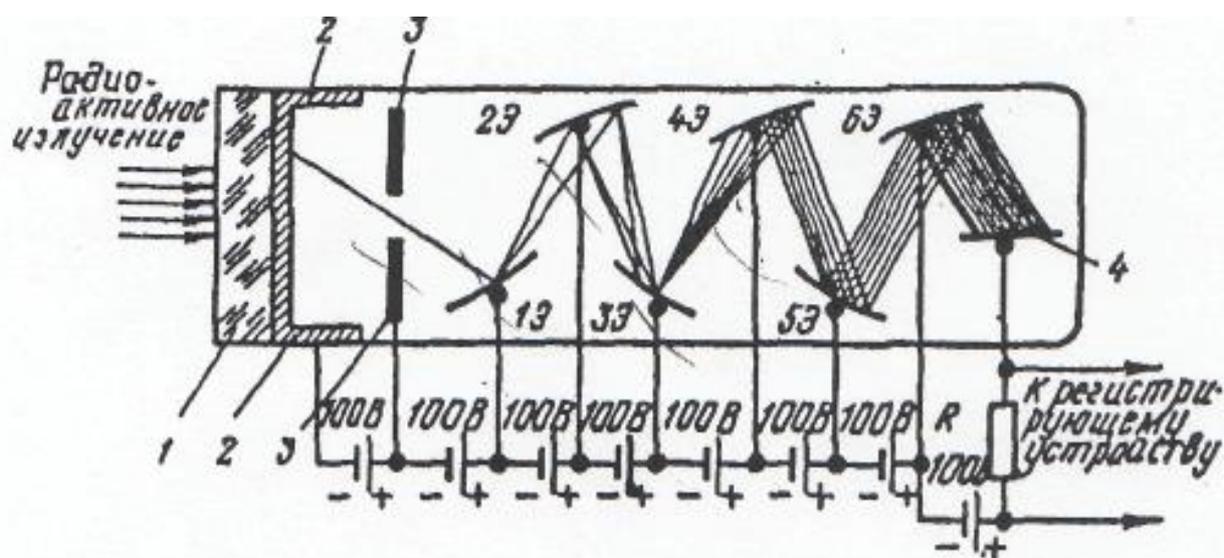


Рис. 6. Схема устройства сцинтилляционного счетчика:

1 - кристалл; 2 - фотокатод; 3 - фокусирующий электрод; 4 - анод; 1Э - 6Э — эмиттеры (диноды).

Сцинтилляционные счетчики обладают более высокой эффективностью счета (до 100%) и разрешающей способностью по сравнению с газоразрядными счетчиками. Разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков достигает  $10^{-5}$  с при регистрации  $\alpha$ -частиц и  $10^{-8}$  с при регистрации  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов. Однако указанные характеристики зависят от примененного сцинтиллятора (фосфора).

По составу сцинтилляторы делят на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию — на твердые, пластические, жидкие и газовые.

Из неорганических сцинтилляторов для регистрации бета- и гамма-излучений удобно использовать йодистый натрий (цезий), активированный таллием —  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , а также вольфрамат кальция —  $\text{CaWO}_4$ , поскольку они могут быть получены в виде больших прозрачных монокристаллов. Для регистрации нейтронов применяют сцинтилляторы из йодистого лития —  $\text{LiI}(\text{Sn})$ , а тяжелых частиц ( $\alpha$ -частиц, осколков деления) — сцинтилляторы на основе сернистого цинка (кадмия), активированного серебром  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Сернистый цинк и сернистый кадмий представляют собой мелкие кристаллики, которые обычно наносят тонким слоем на стеклянную подложку, так, как только тонкие слои таких кристаллических порошков прозрачны для светового излучения. Неорганические сцинтилляторы обладают довольно большим временем высвечивания (большое мертвое время),  $\sim 10^{-6}$  с. Органические и газовые сцинтилляторы характеризуются очень малым временем высвечивания ( $10^{-8}$  —  $10^{-9}$  с).

Весь сцинтилляционный счетчик (сцинтиллятор, световод и ФЭУ) заключен в светонепроницаемый кожух, чтобы исключить попадание постороннего света на фотокатод и диоды ФЭУ. Умножитель защищен от внешних электрических и магнитных полей, которые нарушают фокусировку электронов.

### **Контрольные вопросы:**

1. В чём разница между люминесценцией, флуоресценцией и фосфоресценцией?
2. Какие вещества (по агрегатному состоянию) используют в качестве сцинтилляторов?
3. Из каких частей состоит сцинтилляционный счетчик?
4. В чём состоит принцип действия сцинтилляционного счётчика?
5. Как устроен фотоэлектронный умножитель?
6. Из каких материалов делают диоды?
7. Чему равна эффективность счета и разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков?

### 2.3. Детекторы на основе полупроводников (ПП)

**Проводимость** означает способность вещества проводить электрический ток, а материалы, имеющие хорошую проводимость (например, металлы) называются **проводниками**. Материалы, обладающие слабой проводимостью (например, дерево) называются **диэлектриками**. **Полупроводники** – это вещества, имеющие свойства где-то между этими двумя типами материалов и, несмотря на то, что существует множество веществ с полупроводниковыми свойствами, наиболее часто используемыми для регистрации ионизирующего излучения являются кристаллы кремния (плотность -  $2.3 \text{ г/см}^3$ ) и германия (плотность -  $5.3 \text{ г/см}^3$ ).

Полупроводниковый детектор - прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника. Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла.

Сущность процесса состоит в следующем. В изолированных атомах электроны занимают дискретные энергетические уровни ( $K, L, M$  и т.д.). При объединении  $N$  атомов в кристалл последний можно трактовать как гигантскую молекулу, в которой электроны всех атомов обобществлены, и которую можно рассматривать как единую квантово-механическую систему. В этой системе электроны близкорасположенных энергетических уровней можно объединить в зоны разрешенных состояний. Нижние зоны (довольно узкие) будут целиком заполнены электронами внутренних оболочек атомов. Хотя структура каждой энергетической зоны дискретна, отдельные уровни будут расположены так близко друг к другу, что всю эту область энергий можно рассматривать как практически непрерывную разрешенную энергетическую зону. Промежутки между разрешенными зонами энергетических состояний называют запрещенными зонами.

Свойства кристаллов определяются, главным образом, электронами, расположенными в верхних энергетических зонах. Последняя зона разрешенных состояний, заполненная электронами, называется *валентной зоной*, а первая свободная зона разрешенных состояний, в которую могут переходить электроны из валентной зоны при получении достаточной энергии, называется зоной проводимости. Для перемещения электрона из валентной зоны в зону проводимости необходимо сообщить ему энергию, равную ширине запрещенной зоны, разделяющей зону проводимости и запрещенную зону. Вещества, у которых ширина запрещенной зоны составляет  $\sim 3 \text{ эВ}$ , называются *полупроводниками*, у диэлектриков запрещенная зона гораздо больше, у металлов запрещенная зона практически отсутствует. В металлах электроны под действием внешнего поля

при любой температуре могут участвовать в проводимости. В полупроводниках (а иногда и в изоляторах) часть электронов из валентной зоны за счет тепловой энергии может переходить в зону проводимости, где они также могут свободно перемещаться под действием внешнего поля. При абсолютном нуле полупроводники становятся изоляторами.

Под действием ионизирующего излучения электроны, находящиеся в валентной зоне кристалла-диэлектрика переходят в зону проводимости, при этом в валентной зоне освобождается место, которое назвали «дыркой». Эта незаполненная вакансия, дырка, замещается другим электроном валентной зоны, у которого не хватает энергии для перехода в зону проводимости. Таким образом, остальные электроны в валентной зоне получают возможность перемещаться под действием электрического поля, внося вклад в ток. Вследствие этого, электропроводность в полупроводнике создается не только электронами, перешедшими в зону проводимости, но и электронами в валентной зоне. Электропроводность будет тем больше, чем больше дырок в валентной зоне. Оказалось, гораздо удобнее вместо движения электронов в валентной зоне рассматривать движение дырок, приписывая им положительный заряд, по величине равный заряду электрона, и эффективную массу, примерно равную массе электрона. Следовательно, носителями тока в полупроводнике являются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне.

Таким образом, ионизирующее излучение, проникнув в детектор, создаёт электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «раскасаются», перемещаясь к электродам прибора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется. Регистрация излучения полупроводниковым детектором может проводиться в импульсном и токовом режимах. Использование твердого тела в качестве чувствительного объема вместо газа позволяет увеличить в  $10^4$  раз поглощенную энергию в единице чувствительного объема из-за более высокой плотности вещества и уменьшения на порядок энергии образования пары носителей заряда.

Заряд, собранный на электродах полупроводникового детектора, пропорционален энергии, выделенной ионизирующим излучением при прохождении через чувствительный слой. Поэтому, если частица или квант полностью теряет свою энергию в чувствительном слое, полупроводниковый детектор может работать как спектрометр.

Полупроводниковые детекторы классифицируются следующим образом: кремниевые полупроводниковые детекторы; детекторы на основе германия, легированного литием; детекторы на основе других полупроводниковых материа-

лов (телурида кадмия, поликристаллических сульфида и селенида кадмия, арсенида галлия).

В наиболее распространенных полупроводниках, таких как кремний и германий, энергия, расходуемая на образование носителей информации (заряда) – электронно-дырочной пары – очень небольшая, порядка 3 эВ. В ионизационных камерах на образование пары электрон-положительный ион требуется ~ 30 эВ, а для создания электрона на фотокатоде фотоэлектронного умножителя в сцинтилляционных детекторах нужно затратить ~ 300 эВ. Образование значительно большего числа носителей заряда при поглощении одной и той же энергии уменьшает относительный статистический разброс амплитуд импульсов на выходе детектора, что обуславливает более высокое энергетическое разрешение ППД по сравнению с другими детекторами.

Если полупроводником является идеальный кристалл, то плотность электронов, появившихся в зоне проводимости под действием теплового воздействия, будет равна плотности дырок в валентной зоне. Эти электроны и дырки, имеющие возможность двигаться при возникновении электрического поля, определяют собственную проводимость полупроводника. Чем больше электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости под действием теплового воздействия, тем больше электропроводность кристалла, и тем меньше он годится к использованию в качестве детектора. Поэтому одно из самых важных свойств вещества для изготовления ППД – удельное сопротивление  $\rho$ , которое должно быть достаточно высоким. При комнатной температуре удельное сопротивление у германия составляет ~ 50 Ом×см, у кремния ~  $2 \times 10^5$  Ом×см, при таких значениях для измерений при комнатной температуре пригоден только кремний, и то только для измерения высокоэнергетических частиц. Удельное сопротивление значительно увеличится, если снизить температуру детектора. Обычно полупроводниковый детектор охлаждается жидким азотом, температура кипения которого составляет 77 К (-196 °С).

Достоинство ППД состоит и том, что их можно изготавливать очень малых размеров, поскольку толщина рабочего слоя измеряется десятками или сотнями микрон, а полезная площадь может составлять около 1 см<sup>2</sup>. Вместе с тем они имеют и недостатки. Электропроводность ППД изменяется при нагревании, поэтому во время детектирования измерений полупроводник надо охлаждать жидким азотом. Недостатками полупроводниковых детекторов являются также: малая эффективность при регистрации  $\gamma$ -квантов больших энергии, ухудшение разрешающей способности при активности более  $10^4$  частиц в сек; конечное время жизни полупроводниковых детекторов при высоких дозах облучения из-за накопления радиационных дефектов; малые размеры доступных монокристаллов.

### **Контрольные вопросы:**

1. Чем отличаются диэлектрики и полупроводники?
2. Кристаллы каких веществ наиболее часто используют для регистрации ионизирующего излучения?
4. Электронами, расположенными в каких слоях определяются, главным образом, свойства кристаллов?
5. Каким образом в валентной зоне образуются «дырки»?
6. Как зависит электропроводность полупроводника от количества «дырок» в валентной зоне?
7. Классификация полупроводниковых детекторов.
8. Чему равна энергия, расходуемая на образование носителей зарядов в полупроводниках, ионизационных камерах и в сцинтилляционных детекторах?
9. Назовите недостатки полупроводниковых детекторов.

### **2.4. Детекторы на основе диэлектриков**

Детекторы на основе диэлектриков (стёкла, слюды, природные и синтетические кристаллы, органические полимеры) избирательно чувствительны к многозарядным ионам и осколкам деления ядер. В них, как и в фотоэмульсиях, возникает скрытое изображение в форме остаточных дефектов вдоль трека частицы, которые выявляются химическим травлением.

Следы тяжёлых частиц наблюдаются под микроскопом как каналы или лунки диаметром в десятки и сотни мкм. Диэлектрические детекторы, используемые в ядерной физике и физике высоких энергий, имеют высокую эффективность регистрации и низкий уровень фона. Они не чувствительны к свету,  $\alpha$ -частицам,  $\gamma$ -излучению, высокоэнергичным малозарядным частицам. Их используют и для регистрации нейтронов по осколкам деления ядер, которое эти нейтроны вызывают.

Диэлектрические трековые детекторы – пластинки из силикатного стекла – используются для измерения эффективных сечений деления изотопов Pu, Am, Cm и других под действием быстрых нейтронов. При этом пластинки располагаются в специальных контейнерах - измерительных камерах - параллельно и соосно слою делящегося изотопа. Существуют и плёночные трёрдотельные детекторы, чувствительные к  $\alpha$ -излучению. Примером являются поликарбонатные и нитроцеллюлозные плёнки, используемые для определения радона и продуктов его распада в природных средах. После экспозиции в поле радиации, полимерную пленку электрохимически протравливают в специальном травильном устройстве и треки (пустоты – пробой характерной ромбовидной формы) считают или визуально, или с помощью специального устройства (искрового счётчика). Число зарегистрированных треков соответствует числу  $\alpha$ -частиц, достигших пленку детектора. Из этих данных рассчитывается средняя концентрация радона.

Кристаллический счётчик - прибор для регистрации ионизирующих излучений, основанный на появлении под их действием заметной электропроводности у диэлектриков. Кристаллический счётчик обладает высокой эффективностью. Его действие аналогично действию ионизационной камеры. Если в ионизационной камере заряженная частица образует свободные электроны и ионы, то в кристаллическом диэлектрическом счётчике возникают электронно-дырочные пары. Кристаллический счётчик представляет собой монокристалл диэлектрика (алмаз, сернистый цинк, сульфид кадмия и др.), на противоположные грани которого нанесены электроды; к электродам приложена разность потенциалов. По принципу действия это – твердотельная ионизационная камера. Проходя через кристалл, заряженные частицы вызывают в нём ионизацию. Образующиеся в результате ионизации свободные носители заряда – электроны проводимости и дырки - движутся под влиянием электрического поля к соответствующим электродам. В результате в цепи кристаллического счётчика течёт ток. Сила тока является мерой интенсивности потока ионизирующего излучения. Отдельная ионизирующая частица вызывает в цепи кристаллического счётчика кратковременный импульс тока, который после усиления можно зарегистрировать пересчётным прибором или амплитудным анализатором. При этом амплитуда импульса пропорциональна энергии частицы (если её пробег меньше размеров кристалла). Недостаток кристаллического счётчика - поляризация диэлектрика. Часть носителей заряда при движении к электродам захватывается дефектами кристаллической решётки. Возникает внутреннее электрическое поле, возрастающее по мере облучения кристалла и ослабляющее действие приложенного внешнего поля. Это приводит к уменьшению амплитуды импульсов и к прекращению счёта. Для устранения поляризации применяют нагрев кристалла, его освещение, приложение переменного поля. Простота конструкции кристаллического счётчика, его малые размеры (несколько мм<sup>3</sup>) и способность некоторых кристаллов (например, алмаза) работать при высоких температурах делают кристаллический счётчик удобным для отдельных применений, например, в дозиметрических устройствах. Для отдельных измерений, требующих анализа энергий частиц, лучшими свойствами обладает другая разновидность твердотельной ионизационной камеры - полупроводниковый спектрометр.

### **Контрольные вопросы:**

1. К каким ионизирующим излучениям чувствительны диэлектрические детекторы?
2. Для чего используются диэлектрические трековые детекторы?
3. К какому виду излучений чувствительны плёночные (поликарбонатные, нитроцеллюлозные) твёрдотельные детекторы
4. Принцип устройства кристаллического счётчика.

### 3. Детекторы на основе вторичных эффектов ионизирующих излучений с атомами среды

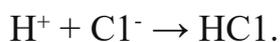
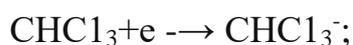
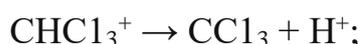
#### 3.1. Химические детекторы

Химический метод обнаружения ионизирующих излучений основан на способности некоторых веществ в результате воздействия излучений распадаться, образуя новые химические соединения. Возбужденные атомы и молекулы диссоциируют, образуя свободные радикалы. Образованные ионы и свободные радикалы вступают в реакции между собой или с другими атомами и молекулами, образуя новые молекулы, появление и количество которых позволяет судить о наличии и количестве ионизирующих излучений.

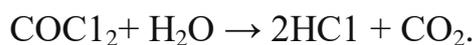
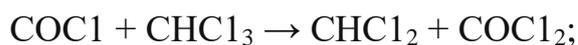
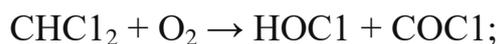
Вещества, воспринимающие энергию ионизирующих излучений и преобразующие ее в химическую энергию, могут находиться во всех трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом. В качестве химических детекторов применяются: хлороформ ( $\text{CHCl}_3$ ); сульфат железа –  $\text{FeSO}_4$  (ферросульфатный детектор); ионы нитрата –  $\text{NO}^{-3}$  (нитратный детектор); сернокислый церий –  $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$  (цериевый детектор); детектор на основе хлорзамещающих углеводов – четыреххлористый углерод ( $\text{CCl}_4$ ).

Хлороформ в воде при облучении распадается с образованием хлороводородной кислоты, которая дает цветную реакцию с красителем (бромкрезолом пурпурным), добавленным к хлороформу.

При облучении хлороформа идут следующие реакции:



В присутствии кислорода выход соляной кислоты повышается:



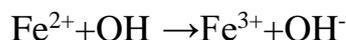
По плотности (интенсивности) окрашивания судят о дозе излучения (поглощенной дозе). На этом принципе устроен химический гамма-дозиметр ДП-70 М. С помощью этого метода измеряется доза гамма-излучения, а также

нейтронного излучения. Дозы измеряются в пределах 10-100 Р и выше (система хлороформа), а при использовании четыреххлористого углерода с этиловым спиртом – от нескольких долей Р и выше.

Химический дозиметр ДП-70 М используется вместе с полевым колориметром ПК-56. Дозиметр представляет стеклянную ампулу, заполненную бесцветной жидкостью. Под действием излучения жидкость изменяет окраску от бледно-розовой до ярко-малиновой. Плотность окраски пропорциональна дозе излучения. Ампула помещена в металлический футляр с крышкой. На внутренней стороне крышки расположен цветной индикатор, окраска которого соответствует дозе в 50 Р.

Для более точного определения используют полевой колориметр, который имеет вращающийся диск со светофильтрами разной плотности окраски, соответствующие дозе в 0, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 450, 600, 800 Р. Диск вращают до совпадения плотности окраски раствора в ампуле с одним из диском (в окне камеры колориметра читаем дозу излучения в рентгенах).

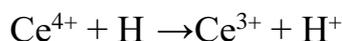
В водных растворах большинства химических соединений происходит диссоциация молекул растворенного вещества на положительные и отрицательные ионы. В результате облучения появляются ионы, радикалы и продукты их рекомбинации за счёт чего изменяются оптические свойства водного раствора, Прозрачность облученного и необлученного растворов измеряют спектрофотометром. Чтобы найти дозу излучения, сравнивают прозрачность облученного и необлученного растворов, измеренных спектрофотометром. На этом принципе построена работа ферросульфатного дозиметра. В нем используется раствор солей двухвалентного железа в слабом водном растворе серной кислоты. В необлученном растворе присутствуют положительные ионы двухвалентных атомов железа  $Fe^{2+}$ . В процессе облучения в растворе происходит накопление положительных ионов трехвалентных атомов железа  $Fe^{3+}$ . Они образуются в реакциях



Ионы  $Fe^{3+}$  интенсивно поглощают световое излучение с длиной волны  $\lambda = 3070 \text{ \AA}$ . Концентрацию ионов  $Fe^{3+}$  в облученном растворе в молях на литр раствора определяют на спектрометре по степени поглощения света с длинами волн вблизи  $\lambda=3070\text{A}$ . При поглощении 100 эВ энергии ионизирующего излучения образуется 15,6 иона  $Fe^{3+}$ . Максимальный предел измерения дозы до 50000 Р.

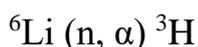
В другом методе к облученному раствору добавляют раствор роданистого калия  $KSCN$ . После химической реакции между ионами  $Fe^{3+}$  и роданистым калием облученный раствор окрашивается в красный цвет. Концентрация ионов  $Fe^{3+}$  пропорциональна степени окраски облученного раствора.

Растворы сернокислого церия в слабом водном растворе серной кислоты содержат ион  $\text{Ce}^{4+}$  (четырёхвалентного атома церия). В облученном растворе ионы  $\text{Ce}^{4+}$  восстанавливаются атомами водорода в ионы трехвалентного атома церия:



Ионы  $\text{Ce}^{3+}$  избирательно поглощают свет в узком интервале длин волн вблизи  $\lambda = 3020 \text{ \AA}$ . Это свойство используют для определения концентрации ионов  $\text{Ce}^{3+}$  по прозрачности облученного раствора сернокислого церия. Концентрацию  $\text{Ce}^{4+}$  определяют до и после облучения спектрометрически или титрованием. Измерение дозы возможно до  $12000000 \text{ Р}$ .

Химические дозиметры для медленных нейтронов содержат в растворах сульфат лития. Под действием медленных нейтронов на литии идет экзотермическая реакция



Тритон  ${}^3\text{H}$  (ядро трития) и  $\alpha$ -частица разрывают молекулу воды на атом водорода и радикал  $\text{OH}$ , которые и изменяют заряд ионов железа или церия.

Химические дозиметры для  $\gamma$ -квантов контролируют интенсивность  $\gamma$ -излучения по количеству газа, выделяющегося из облученных водных растворов. В воде растворяют небольшое количество йодистого натрия  $\text{NaI}$ . Он диссоциирует на ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{I}^-$ . Радикалы  $\text{OH}^\bullet$  отнимают электроны у ионов йода, превращая их в газообразные атомы. Скорость выделения газа пропорциональна поглощенной энергии, т. е. дозе излучения. Химические дозиметры, заполненные водным раствором йодистого натрия, пригодны для измерения дозы медленных нейтронов. Для этого к водному раствору йодистого натрия добавляют борную кислоту. Йод выделяется из раствора под действием  $\alpha$ -частиц и ядер  ${}^7\text{Li}$ , возникающих в реакциях  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha) {}^7\text{Li}$ . Химическими дозиметрами измеряют большие дозы излучения. Необходимость таких дозиметров и возникла после появления мощных источников с активностями в десятки Кюри.

Ферросульфитные дозиметры пригодны при измерении дозы излучения  $D \sim 5 \cdot 10^4 \text{ Р}$ , а дозиметры с сернокислым церием дают хорошие показатели до значений  $D \sim 10^6 \text{ Р}$ . Химическими дозиметрами с борированным водным раствором йодистого натрия контролируют потоки медленных нейтронов из ядерных реакторов до  $10^{15}$  нейтрон/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ).

Некоторые прозрачные пластмассы (полистирол, полиметилметакрилат и

др.) и сорта стекол (фосфатные, активированные серебром) темнеют под воздействием бета- и гамма-излучений. Коэффициент поглощения света для них растет линейно с увеличением дозы облучения. Дозу измеряют до 2 - 10 Р. Под воздействием излучений изменяется молекулярный состав газов. Этим пользуются в газовых дозиметрах.

### **Контрольные вопросы:**

1. На чём основаны химические методы обнаружения ионизирующих излучений?
2. В каких агрегатных состояниях могут находиться вещества, воспринимающие энергию ионизирующих излучений?
3. Какие реакции происходят с хлороформом при его облучении?
4. На каком принципе устроен химический гамма-дозиметр ДП-70 М?
5. Каким прибором измеряют прозрачность облученного и необлученного растворов?
6. На каком принципе построена работа ферросульфатного детектора?
7. На каком принципе построена работа цериевого детектора?
8. Что содержат химические детекторы для медленных нейтронов?
9. Что содержат химические детекторы для  $\gamma$ -квантов?

### **3.2. Калориметрические детекторы**

**Калориметрический метод** основан на измерении с помощью специальных калориметров тепловой энергии, выделяющейся при поглощении энергии излучения в веществе.

Энергия ядерного излучения, поглощенного веществом, превращается в тепло. Количество тепла зависит от интенсивности излучения, размеров и состава тела. Пусть на поверхность тела падает излучение с определённой интенсивностью ( $I$ ), а каждая частица теряет в теле долю энергии ( $\eta$ ). Для заряженного излучения значение  $\eta$  близко к единице, однако для  $\gamma$ -квантов оно может значительно отличаться от единицы. Количество тепла ( $Q$ ), выделяемое каждую секунду в столбе слоя сечением  $1 \text{ см}^2$ , связано с интенсивностью ( $I$ ) уравнением

$$Q = \eta I$$

Следовательно, теплу ( $Q$ ) соответствует определенное значение интенсивности ( $I$ ). Пропорциональность величин  $Q$  и  $I$  используют при измерении дозы получения. По выделяющемуся теплу определяют активность препаратов. Тепло ( $Q$ ) измеряют калориметром.

В зависимости от назначения и принципов измерения тепла ( $Q$ ) калориметры различаются по конструкции.

Одним из калориметров определяют  $\alpha$ - и  $\beta$ -активности препаратов. Он состоит из двух калориметрических цилиндров, заключенных в герметичный металлический корпус. В одном из цилиндров помещена проволочная катушка, служащая для градуировки калориметра. В дно каждого цилиндра вмонтированы термопары, включенные в электрическую цепь с гальванометром. Во второй калориметрический цилиндр опускают исследуемый препарат с известной энергией распада. Калориметр помещают в термостат, поддерживающий постоянную температуру корпуса. Перед началом измерения калориметр градуируют. Для этого через проволочную катушку пропускают электрический ток. Мощность катушки расходуется на повышение температуры калориметрических цилиндров и теплоотдачу с поверхности калориметра в термостат. Так как мощность катушки постоянна, то с течением времени температуры калориметрических цилиндров с катушкой и без катушки станут равными соответственно  $t^1$  и  $t^2$ , а вся мощность катушки будет утекать в термостат. Из этого условия находят связь между мощностью катушки ( $Q$ ), внешней поверхностью калориметра ( $S$ ) и разностью температур  $\Delta t = t^1 - t^2$ . По разности температур и показаниям гальванометра и градуируют калориметр. Затем в проградированный калориметр опускают исследуемый препарат. Если в радиоактивном распаде испускаются только  $\alpha$ -частицы, то тепловая мощность препарата пропорциональна энергии  $\alpha$ -распада, так как все  $\alpha$ -частицы поглощаются в калориметре. При измерении  $\beta$ -активности учитывают, что примерно  $2/3$  энергии распада уносится нейтрино, а  $1/3$  энергии распада поглощается в калориметре. Если же  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады сопровождаются испусканием  $\gamma$ -квантов, то делают поправку на поглощение  $\gamma$ -квантов в калориметре.

В другом типе калориметра тепловую мощность препарата находят по количеству жидкости, перешедшей в газообразное состояние. Одной из таких жидкостей является азот. Им заливают пространство вокруг калориметрической камеры с препаратом. Тепловая мощность ( $Q$ ) препарата расходуется на испарение азота. Масса газообразного азота ( $M$ ) связана с мощностью ( $Q$ ) уравнением

$$Q = rM,$$

где  $r$  — теплота парообразования азота.

Она равна теплу, которое необходимо подвести к жидкости при температуре кипения, чтобы превратить 1 кг жидкости в пар. Результаты, полученные калориметрическим методом, зависят только от измеренного количества тепла.

На них не влияют размеры и вес препарата, особенности взаимодействия ядерного излучения с веществом. Калориметрические методы незаменимы при изучении дозы сложного по составу излучения мощных ядерных реакторов. Найти точно дозу такого излучения другими методами весьма затруднительно. Калориметрические методы детектирования ионизирующей радиации характеризуются низкой чувствительностью. Поэтому их применяют для измерения высоких активностей и доз излучения.

### **Контрольные вопросы:**

1. На чём основаны калориметрические методы обнаружения ионизирующих излучений?
2. Как выделяемое количество тепла ( $Q$ ), связано с интенсивностью излучения ( $I$ )?
3. Каким прибором определяют количество тепла, выделяющееся при поглощении энергии излучения в веществе?
4. Устройство калориметра для измерения тепла у  $\alpha$ - и  $\beta$ -активных препаратов.
5. Особенности тепловой мощности от  $\alpha$ - и  $\beta$ -активных препаратов.
6. Калориметрические методы детектирования ионизирующей радиации применяют для измерения высоких или низких активностей и доз излучения?

### **3.3. Фотографические детекторы, автордиография**

**Фотографический метод** исторически был первым способом обнаружения ядерных излучений, позволившим открыть радиоактивность. Он основан на том, что излучение, взаимодействуя с галогенидами серебра ( $AgBr$  или  $AgCl$ ) фотоэмульсии, восстанавливает металлическое серебро подобно видимому свету, которое после проявления выделяется в виде почернения.

Степень почернения фотоэмульсии (фотопластинки) пропорциональна дозе излучения. На этом принципе основан получивший широкое распространение индивидуальный дозиметрический фотоконтроль (ИФК) для лиц, работающих с бета- и гамма-излучением.

В настоящее время фотографический метод широко применяется в ядерной физике при исследовании свойств самых различных заряженных частиц, их взаимодействий и ядерных реакций. Для этих целей были созданы специальные ядерные фотоэмульсии и толстослойные фотопластинки. Фотографический метод дает хорошие результаты при абсолютных измерениях небольших активностей.

В биологии он сформировался в специальный метод, называемый автордиографией.

**Авторадиография** (радиоавтография) — метод получения фотографических изображений в результате действия на фотоэмульсию излучения радиоактивных элементов, находящихся в исследуемом объекте. Впервые для изучения животных организмов авторадиографию применил русский ученый Е. С. Лондон - в 1904 г. К настоящему времени методика авторадиографии значительно усовершенствована и с ее помощью достигнуты большие успехи в изучении обменных процессов, а также в исследовании распределения и локализации радиоактивных веществ в клетках и тканях животных и растений.

Авторадиографию делят на макроавторадиографию и микроавторадиографию. Макроавторадиография (контактная, контрастная) даст картину распределения радиоактивных изотопов в макроструктурах биологического объекта (количественную оценку концентрации радиоизотопа), по которой можно судить о характере обмена и органотропности радионуклида. Микроавторадиография (гистоавторадиография) позволяет изучать внутриклеточную локализацию радиоактивного вещества, а также клеточные структуры и сложные биохимические процессы в них (синтез белков, ферментов и т. д.).

Сущность метода авторадиографических исследований сводится к следующему:

- а) к предварительному введению подопытному животному того или иного количества радиоактивного изотопа;
- б) взятию у него тех или иных органов и изготовлению из них препаратов (гистосрезы, шлифы, мазки крови и т. д.) для авторадиографии;
- в) созданию в течение определенного времени тесного контакта между изготовленным препаратом, содержащим радиоактивный элемент, и фотоэмульсией;
- г) проявлению и фиксации фотоматериала, как это делается в обычной фотографии.

В качестве фотоматериала для макрорадиоавтографии используют высокочувствительные рентгеновские и фотографические пленки, для гисторадиографии — специальные жидкие и съёмные ядерные эмульсии (типы «Р», «К», «МР» и др.), которыми покрывают исследуемые гистологические препараты.

Радиоавтографы представляют собой скопление черных зерен восстановленного серебра фотоэмульсии, указывающее на место расположения радиоактивного вещества в исследуемом материале.

Макрорадиоавтографы анализируют визуально, а при количественной оценке на радиоактивность проводят денситометрию оптической плотности почернения фотоэмульсии радиоавтограмм в сравнении с плотностью почернения фотоэмульсии от эталонного источника излучения известной радиоактивности.

Гисторadioавтографы изучают под микроскопом одновременно с гистологическим препаратом. При их количественной оценке подсчитывают зерна восстановленного серебра или треки  $\alpha$ -или  $\beta$ -частиц в эмульсии под большим увеличением микроскопа с помощью окулярмикрометра с сеткой.

Следует отметить, что радиоавтографический метод в биологических исследованиях имеет ряд преимуществ перед другими в том, что фотографическая эмульсия, сохраняя постоянные свойства в течение нескольких месяцев, способна непрерывно регистрировать радиоактивные распады очень малых количеств радиоактивного вещества, улавливая суммарное число распадов за время экспозиции. Это позволяет уменьшить дозы вводимых радионуклидов в исследуемый организм и тем самым не нарушать естественный ход биохимических процессов в нем. Кроме того, радиоавтографы подобно рентгенограммам являются наглядным объективным документом проводимых исследований.

А.Д. Белов разработал методику «двойных радиоавтографов», которая в отличие от существующих методик позволяет получить отдельно радиоавтограммы от двух радиоактивных изотопов, одновременно находящихся в одном и том же исследуемом объекте. Эта методика основана на учете различия энергии излучения и продолжительности «жизни» изотопов. Так, при изучении фосфорно-кальциевого обмена в костях с помощью  $^{32}\text{P}$  и  $^{45}\text{Ca}$  можно получить отдельно радиоавтографы на указанные изотопы при одновременном их введении подопытному животному. Учитывая сравнительно высокую энергию излучения и малый период полураспада  $^{32}\text{P}$ , получают вначале радиоавтограф па данный элемент. Для этого между исследуемым объектом и фотоэмульсией помещают фильтр, поглощающий мягкое  $\beta$ -излучение  $^{45}\text{Ca}$ . Радиоавтограф на  $^{45}\text{Ca}$  получают после распада  $^{32}\text{P}$ .

Методика «двойных радиоавтографов» позволяет не только вдвое экономнее использовать подопытных животных, но и получать более достоверные данные, так как появляется возможность сравнивать на одном и том же животном накопление и распределение сразу двух меченых веществ и избегать затруднений, возникающих при сопоставлении таких показателей, полученных от разных животных. С помощью методики «двойной радиоавтографии» изучена динамика белково-минерального обмена в костной ткани разных видов животных (собаки, овцы, свиньи, телёнка) в норме, при заживлении переломов и при различных способах остеосинтеза и стимуляции остеогенеза в сопоставлении с рентгеноморфологической картиной и гистохимической активностью щелочной и кислой фосфатаз в костях. Было установле-

но, что белковый и фосфорно-кальциевый обмен в костях, в норме и при переломах находится в прямой зависимости между белковым, фосфорно-кальциевым обменом и с ферментативной активностью щелочной и кислой фосфатаз. Наибольшая интенсивность белкового и фосфорно-кальциевого обмена протекает в тех участках костного органа (периост, эндоост, костный мозг, стенки гаверсовых каналов и губчатая часть эпифизов, а также тканей костной мозоли), где сильнее проявляются энзиматическая активность фосфатаз, рост, развитие и перестройка костной ткани.

С, помощью гамма-излучающих радиоизотопов  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{42}\text{K}$  и других, введённых в организм, путем наружной прижизненной радиометрии были получены принципиально новые данные измерения скорости кровотока, массы крови, функционального состояния щитовидной железы и других органов и систем животных.

### **Контрольные вопросы:**

1. На чём основаны фотографические методы обнаружения ионизирующих излучений?
2. Кто впервые применил для изучения животных организмов автордиографию?
3. На какие виды делят автордиографию?
4. О чём можно судить по макроавтордиографии?
5. Что позволяет изучить микроавтордиография?
6. Перечислить последовательность этапов метода автордиографических исследований.
7. Что используют качестве фотоматериала для макроравтордиографии?
8. Что используют качестве фотоматериала для гисторавтордиографии?
9. В чём состоит сущность методики «двойных радиоавтографов»?
10. В чём преимущества методики «двойных радиоавтографов»?

## **4. Приборы для измерения излучений и их назначение**

Приборы для измерения ионизирующих излучений можно условно разделить на три категории: радиометрические (радиометры), дозиметрические (дозиметры) блоки и спектрометры.

Отечественная и зарубежная промышленность выпускает много различных типов радиометрических и дозиметрических приборов и установок, которые могут быть классифицированы: по способу регистрации излучений (ионизационные, сцинтилляционные, фотодозиметрические и др.), виду регистрируе-

мого излучения (для тяжелых заряженных частиц, бета- и гамма-излучений и т. д.), источнику питания (сетевые, батарейные, аккумуляторные) и назначению.

Следует иметь в виду, что приведенная классификация в известной мере условна, поскольку некоторые приборы могут быть использованы не только по своему прямому назначению. К настоящему времени еще не установлена единая терминология и классификация приборов и установок.

**Радиометры** — это приборы с газоразрядными, сцинтилляционными счетчиками и другими детекторами, предназначенные для измерения активности радиоактивных препаратов и источников излучения, для определения плотности потока или интенсивности ионизирующих частиц и квантов, поверхностной радиоактивности предметов, удельной активности аэрозолей, газов и жидкостей.

Для более точных измерений активности препаратов и потоков частиц применяют стационарные радиометры, которые осуществляют дискретный счет попавших в детектор частиц и квантов (дифференциальные измерения). Стационарный радиометр, как правило, состоит из детектора — датчика импульсов, импульсного усилителя, пересчетного прибора, электромеханического нумератора или другого отсчетного устройства, источника высокого напряжения для питания детектора и источника питания всей аппаратуры.

К таким приборам относятся, например, ранее выпускавшиеся радиометры Б-2, Б-3, Б-4, а также технически более совершенные стационарные детекторные радиометры ПП-8 (рис. 7), РПС-2-ОЗТ (рис. 8) и др., работающие с газоразрядными и сцинтилляционными счетчиками.

В настоящее время в связи с интенсивным внедрением в медицинскую, биологическую, ветеринарную и научно-диагностическую практику радиоиммунологического анализа (РИА) отечественной промышленностью выпускаются специальные комплекты лабораторий, позволяющие автоматизировать все процессы анализа, проводить обработку большого количества образцов непрерывно в течение длительного времени, сохраняя при этом основные технические характеристики: высокую стабильность эффективности счета, надежную защиту блока памяти, невысокие требования к питающему напряжению сети, надежность системы автоматической подачи и смены исследуемых образцов и т. д. Для этих целей был налажен выпуск гамма-анализаторов («Гамма-1», «Гамма-12») и бета-анализаторов («Бета-2»), отвечающих требованиям РИА.

Радиометрическая установка «Гамма-1» предназначена для регистрации низкоэнергетических гамма-квантов ( $^{251}$ ) с автоматической обработкой результатов радиоиммунологического анализа. Она состоит из автоматического сменщика проб, электронно-измерительного устройства и блока цифрорпечати. В зависимости от варианта исполнения в комплект радиометра «Гамма-1» вхо-

дит ЭВМ «Электроника-ДЗ-28» для обработки результатов измерения. Эффективность регистрации излучения  $^{125}\text{I}$  не менее 45%, фон — не более 60 имп/мин. В систему автоматической смены образцов одновременно можно ввести до 300 проб.

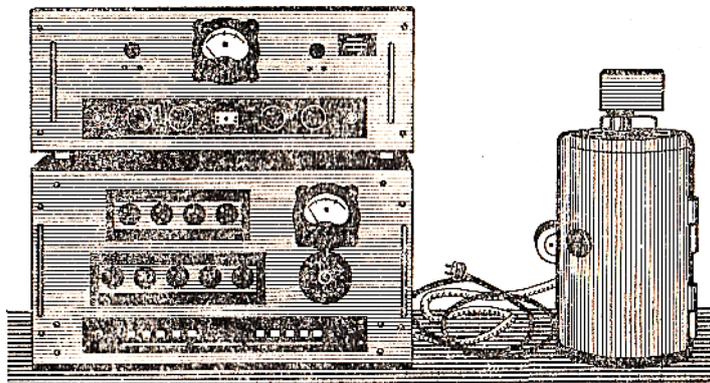


Рис. 7. Радиометр ПП-8 («Волна»)

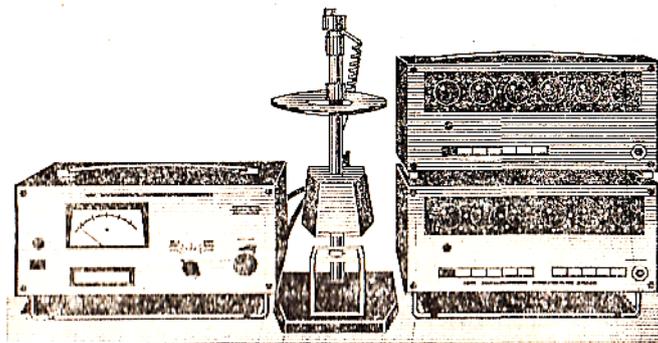


Рис. 8. Радиометр PПС 2-ОЗТ

С помощью ЭВМ и цифropечатающего устройства производится автоматическая обработка результатов радиоиммунологического анализа. Построение калибровочной кривой и расчет концентраций неизвестного образца осуществляется при одновременной регистрации результатов.

В радиометре «Гамма-12» имеется 12 детекторов, за счет чего он способен одновременно проводить определение радиоактивности по гамма-излучению и обработку результатов 12 образцов. Это высокопроизводительный гамма-счетчик. За один рабочий день можно просчитать до 6000 образцов. Однако смену проб при работе с этим счетчиком необходимо проводить вручную. Помимо обработки результатов РИА, данные счетчики можно использовать для регистрации любых гамма-активных изотопов с низкой энергией излучения, что значительно расширяет их применение в радиологической практике.

При использовании в радиоиммунологическом анализе в качестве метки бета-активных изотопов обработку результатов РИА проводили с помощью

радиометра «Бета-2», имеющего жидкостносцинтилляционный счетчик. Дискриминатор спектра позволяет проводить регистрацию бета-частиц в узкой спектральной области. В счетчике имеется два регистрационных канала, в которых независимо друг от друга производят счет радиоактивности образца в разных областях энергетического спектра. Это позволяет одновременно вести обработку результатов в пробе, содержащей два изотопа с различными уровнями энергии испускаемых бета-частиц. Кроме обычных, характерных для бета-радиометров блоков, в приборе имеется ЭВМ, печатающее устройство и система автоматической смены и подачи в детектор образцов, в результате этого все этапы обработки РИА — счет радиоактивности, вычисление скорости счета, построение калибровочной кривой и определение по ней концентрации неизвестных веществ — осуществляются автоматически. Несмотря на то, что счетчик специализирован для радиоиммунологического анализа, он с успехом может быть использован для жидкостносцинтилляционного счета любых бета-активных изотопов.

Переносные (полевые) радиометры имеют малые габариты и автономное (батарейное) питание. Они содержат более простое электронное устройство, позволяющее проводить измерения при помощи стрелочного прибора (интегральные измерения). При облучении детектора отклонение стрелки выходного прибора (микроамперметра) показывает значение средней скорости счета в имп/с. Такие устройства называют измерителями скорости счета, или интенсиметрами. По точности измерений переносные приборы, содержащие интегрирующую схему, уступают стационарным пересчетным приборам.

Из переносных радиометров применялись: универсальный бета- и гамма-радиометр «Луч-А», предназначенный для качественного и количественного раздельного определения бета- и гамма-излучений, а также плотности потока  $\beta$ -частиц (0—1000 имп/с); бета-гамма-радиометр-рентгенометр ДП-5А, который служил для обнаружения и количественного определения  $\beta$ -загрязненности поверхностей различных предметов и мог быть использован для измерения малых уровней  $\gamma$ -радиации; универсальный радиометр РУП-1 (рис. 9), предназначенный для измерения степени загрязненности поверхностей альфа- и бета-активными веществами, мощности доз гамма излучения и интенсивности потоков тепловых и быстрых нейтронов. Для этого РУП-1 был оснащен датчиками для обнаружения альфа-, бета- и гамма-излучения.

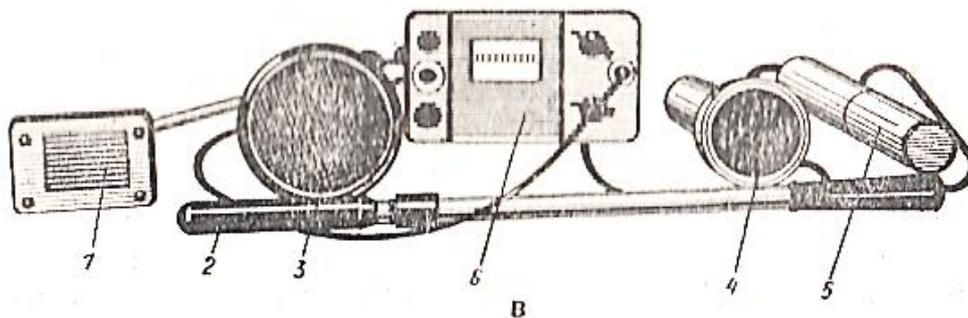


Рис. 9. Радиометр РУП-1 (1 — бета-датчик; 2 — гамма-датчик; 3 — альфа-датчик; 4 — датчик тепловых нейтронов; 5 — датчик быстрых нейтронов; 6 — пульт РУП-1)

Диапазон измерения радиометра РУП-1 по внешнему альфа излучению от  $0,5 >$  до 20000 частиц/мин  $\text{см}^2$ , по внешнему бета излучению от 10 до 50000 частиц/мин  $\text{см}^2$ , по гамма излучению от 0,2 до 1000 мкР/г или датчика со штангой №1 и от 2 до 10000 мкР/г для датчика с длинным кабелем, по тепловым и быстрым нейтронам от 20 до  $10^5$  нейтронов/с  $\text{см}^2$ . Радиометр отградуирован для альфа-диапазона по изотопу плутония-239, для бета-диапазона - по изотопу стронций-90 + иттрий-90, для гамма-диапазона - по изотопу кобальт-60, для нейтронов - по полоний-берилиевому источнику. Приборная погрешность измерения РУП-1 при нормальных внешних условиях не превышала  $\pm 20\%$  относительно минимального значения шкалы соответствующего поддиапазона. Питание РУП-1 осуществлялось от сети переменного тока с напряжением 220 В и от источников постоянного тока — аккумуляторов или гальванических батарей.

Дозиметры (рентгенометры) — приборы, измеряющие экспозиционную, поглощенную и эквивалентную дозы излучения или соответствующие мощности доз. Дозиметры состоят из трех основных частей: детектора, радиотехнической схемы, усиливающей ионизационный ток, и регистрирующего (измерительного) устройства.

По принципу действия дозиметры можно разделить на две группы. Первую группу составляют дозиметры, измеряющие мощность дозы в рентгенах в единицу времени, так называемые измерители мощности дозы. Ко второй группе относят интегрирующие дозиметры, измеряющие дозу излучения за какой-либо промежуток времени. Детектором излучения в измерителях мощности дозы могут быть ионизационные камеры, газоразрядный или сцинтилляционный счетчик. В качестве детектора в интегрирующих приборах обычно применяют ионизационные камеры.

По характеру применения дозиметры делят на стационарные переносные и приборы индивидуального дозиметрического контроля.

Стационарные дозиметры применяют обычно в лабораторных условиях, так как они по габаритам и массе неудобны для переноски. К ним, например, относился дозиметр сетевого питания «Кактус», предназначенный для измерения мощности дозы гамма-излучения.

Из переносных дозиметров применяли портативный микрорентгенометр ПМР-1, рентгенометры РМ-1М, МРМ-2, РП-1, ДП-5А, ДРГЗ-02 (рис. 10) и другие, предназначенные для измерения дозы рентгеновского и гамма-излучения.

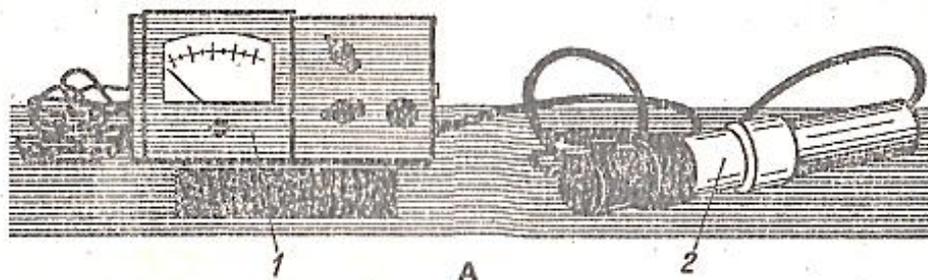


Рис. 10. Дозиметр ДРГЗ- 02 - для измерения рентгеновского и  $\gamma$ -излучения (1 — измерительный пульт; 2 — детектор)

Подробные технические характеристики, принцип работы и правила эксплуатации этих приборов изложены в прилагаемых к ним паспортах.

**Дозиметр СРП 68 01** (рис. 11) применяют для обнаружения радиоактивных веществ по гамма-излучению и измерения мощности дозы в диапазоне от 10 до 3000 мкР/ч.



Рис. 11. Дозиметр СРП 68 01

**Измеритель мощности дозы ДКГ 01 «Сталкер»** имеет устройство для определения географических координат, что дает возможность использовать его для ведения автомобильной радиационной разведки. К этому типу приборов можно отнести также дозиметры ДРГ01Т1, ДБГ06Т.

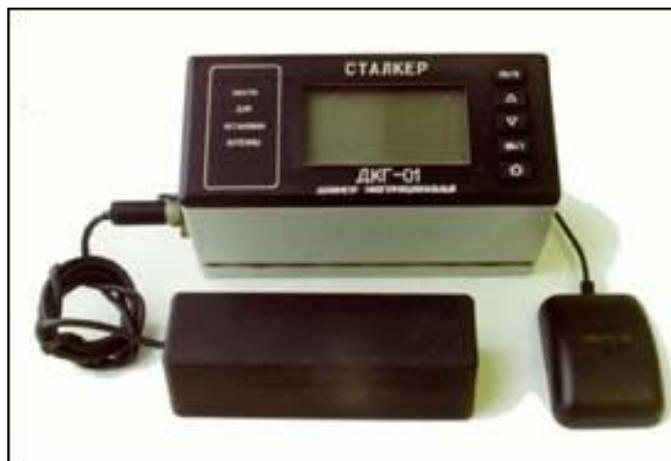


Рис. 12. Измеритель мощности дозы ДКГ 01 «Сталкер»

**Дозиметр-радиометр АНРИ 01** (рис. 13) (Сосна), индикатор внешнего гамма-излучения «Белла», бытовые дозиметры, такие как ДБГ01Н, МС04Б-Эксперт, могут быть использованы с целью оперативного контроля радиационной обстановки на местности, в рабочих и жилых помещениях, на животноводческих фермах.



Рис. 13. Дозиметр-радиометр АНРИ 01

**Дозиметр-радиометр МКС 06Н** (Инспектор) позволяет измерять мощность эквивалентной дозы гамма-излучения от 0,1 до 1000 мкЗв/ч, плотность потока бета-частиц с загрязненных поверхностей от 1 до 10000 частиц/(см<sup>2</sup>/мин), удельную активность бета-излучающих нуклидов в различных объектах в диапазоне от 0,1 до 1000 кБк/кг, степень загрязнения поверхностей альфа-активными веществами в лабораториях, на местности и в промышленности в диапазоне от 1 до 10000 частиц/(см<sup>2</sup>).

**Дозиметр СЕМ DT-9501 481943** - это компактный и чувствительный прибор для оценки уровня радиоактивной загрязненности мусорных свалок, лесного массива, столовой посуды, медицинского кабинета. Модель позволяет фиксировать альфа-, бета-, гамма- и рентгеновское излучение с высокой точностью при помощи встроенного счетчика Гейгера. Диапазон показаний уровня радиоактивного фона до 1000 мкР/ч. Регистрируемая энергия гамма-излучения от 0,02 МэВ.

**Дозиметр DO-RA, VDR-IRQ1801-red.** Гаджеты линии DO-RA, как периферийные устройства предназначены для индикации ионизирующего излучения в местах анализа и контроля радиационной обстановки их владельцами в сочетании со смартфонами, планшетными и настольным компьютерами. Результаты измерений выводятся на дисплей смартфонов и компьютеров благодаря пользовательскому приложению DO-RA по бесплатно скаченному из App Store или Google Play в сочетании с датчиком DO-RA.

#### **Дозиметр СОЭКС 01М (рис. 14)**



Несмотря на свои компактные размеры, данный прибор сочетает богатый функционал, высокую скорость измерения и простоту использования.

Для измерения радиации в приборе применен надежный, профессиональный счетчик Гейгера Мюлера СБМ 20-1 российского производства.

Оценивает радиационный фон по величине мощности ионизирующего излучения (гамма-, бета-, с учетом рентгеновского излучения), фиксирует накопленную дозу. Функция "ПОИСК" позволяет быстро реагировать на источник излучения.

Рис. 14. Дозиметр СОЭКС 01М

#### **Характеристики:**

- Диапазон показаний уровня радиоактивного фона, мкЗв/ч - до 999
- Регистрируемая энергия гамма-излучения, МэВ - от 0,1
- Пороги предупреждения, мкЗв/ч - от 0,3 до 100
- Время измерения, секунд - до 20
- Индикация показаний - непрерывная, числовая, графическая
- Элементы питания - аккумуляторы или батарейки ААА, от сетевого адаптера или USB
- Диапазон напряжения питания - 1,9 - 3,5 В
- Время непрерывной работы - до 10 часов

- Габаритные размеры, высота x ширина x толщина, не более 105x43x18 мм
- Дисплей - цветной TFT, 128x160
- Диапазон рабочих температур - от -20 до +60°C

### Дозиметр радиоактивности эколог мини (рис. 15).



Карманный прибор (рис. 15), с непрерывным уточнением результата измерения, позволяет оперативно оценить радиационную обстановку и наличие радиационного загрязнения жилых помещений, продуктов питания, строительных материалов, автомобилей, мебели, одежды, бытовых предметов по трём видам излучений (альфа-, бета-, гамма-, включая рентгеновское). Прибор отражает цифровую, текстовую, звуковую информацию и предназначен: для измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы (амбиентная эквивалентная доза – есть эквивалентная доза на глубине  $d=10$  мм от поверхности шара из тканеэквивалентного материала плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  диаметром 30 см) гамма-излучения; для измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения; для измерения экспозиционной дозы гамма-излучения; для оценки плотности потока альфа-частиц и бета-частиц с загрязнённых поверхностей. С помощью прибора можно проводить мониторинг окружающей среды и поиск радиоактивных пятен. Эксплуатация прибора не требует специальной подготовки. Лёгкий и доступный прибор предназначен для широкого применения.

Эксплуатация прибора не требует специальной подготовки. Лёгкий и доступный прибор предназначен для широкого применения.

Основные характеристики.

Датчик – два газоразрядных торцевых счётчика Гейгера-Мюллера СБТ-9;

Диапазон измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) фотонного излучения, мкР/ч ( $10 \div 9999$ );

Диапазон измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАД) фотонного излучения, мкЗв/ч ( $0,10 \div 99,99$ );

Диапазон измерения экспозиционной дозы (ЭД) фотонного излучения, мР ( $0,001 \div 9,999$ );

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений МЭД, МАД, %, не более  $\pm 20$ ;

Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений ЭД, %, не более  $\pm 20$ ;

Энергетическая зависимость чувствительности прибора (относительно радионуклида цезий-137) в диапазоне энергий от 50 до 3000 кэВ, менее 25%;

Диапазон энергий регистрируемых фотонов, кэВ ( $50 \div 3000$ );

Диапазон энергий регистрируемых бета- частиц, кэВ ( $50 \div 3500$ );

Диапазон энергий регистрируемых альфа- частиц, кэВ ( $3000 \div 10000$ );

Период измерения (цикл), с., (10), (33);

Вывод на экран среднего значения за периоды измерений:

МАД (10с.) – до 1000 циклов,

МЭД (33с.) – до 99 циклов;

Выбор порога сигнализации превышения МЭД: 30мкР\ч, 60мкР\ч, 120мкР\ч, 250мкР\ч, с возможностью отключения;

Звуковая сигнализация регистрации импульсов с возможностью отключения;

Вывод на экран времени измерения (секундомер), с.,  $1 \div 9999$ ;

Индикация оставшегося времени цикла измерения;

Возможность включения подсветки экрана;

Время установления рабочего режима, с., не более 3;

Индикация состояния батареи питания;

Время непрерывной работы от батареи питания «DURACELL» типа 6LR61, ч., 400, при этом нестабильность показаний, %, не более  $\pm 5$ ;

Напряжение питания, В, 9 ( $\pm 3$ );

Ток потребления, мА, не более 4;

Диапазон рабочих температур, С, ( $-15 / +50$ );

Габаритные размеры, мм, 100x60x26;

Масса, кг (с батареей питания), 0,125;

**Профессиональный дозиметр СОЭКС Квантум** - профессиональный прибор с двумя счетчиками Гейгера СБМ 20-1. (Разработано и произведено в России).



Дозиметр СОЭКС Квантум (рис. 16) внесен в реестр средств измерения (Свидетельство об утверждении типа средства измерений № 62619-15, выдано 08 декабря 2015г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии). Прибор прост в использовании, удобен как неподготовленному пользователю, так и профессионалу. При необходимости прибор может быть поверен в любой аккредитованной лаборатории, согласно утвержденной методике поверки.

Рис. 16. Профессиональный дозиметр СОЭКС Квантум

Квантум продается более чем в 40 странах мира, а объем производства идет на десятки тысяч штук.

Квантум можно подключить к компьютеру для переноса результатов измерения в Excel, настройки прибора или обновления прошивки.

Характеристики.

Диапазон показаний уровня радиоактивного фона, - до 1 000 мкЗв/ч.

Диапазон измерения накопленной дозы - до 1 000 Зв.

Время накопления дозы - до 10 000 часов.

Накопление истории измерения радиационного фона не - менее 24 часа с шагом 10 секунд.

Регистрируемая энергия гамма-излучения - от 0,1 МэВ.

Пороги предупреждения - от 0,3 до 100 мкЗв/ч.

Время измерения - 10 секунд.

Погрешность измерения - не более +/- 15%.

Индикация показаний - непрерывная, числовая, графическая.

Элементы питания, дополнительное питание - аккумуляторы или батарейки ААА, от сетевого адаптера или USB.

Диапазон напряжения питания - 1,9 - 3,0 В

Время непрерывной работы изделия - до 700 часов

Габаритные размеры высота x ширина x толщина, не более - 130x52x18 мм<sup>3</sup>.

Масса изделия (без элементов питания) - не более, 71 гр.

Ток заряда аккумуляторов - не более 300 мА.

Потребляемый ток от зарядного устройства или USB, не более 500 мА.

Напряжение на выходе зарядного устройства, -от 4,5 до 5,5 В.

Дисплей Цветной TFT - 128x160.

Диапазон рабочих температур - от -20 до +60 С°.

**Спектрометры** (гамма-спектрометрические установки) состоят из следующих элементов: детектора, который служит для преобразования энергии гамма-квантов в электрический импульс предусилителя, усиливающего сигнал блока питания детектора и спектрометрического усилителя, формирующего сигнал нужной формы и защищающего последующие устройства от шумов малой амплитуды, отсекая их специальным дискриминатором аналого-цифрового преобразователя (АЦП, измеряющего амплитуду каждого импульса и накапливающего информацию о них в памяти монитора (осциллограф или экран компьютера), который служит для визуализации гистограмм поступивших импульсов.

В спектрометрах чаще применяют сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы. Предусилитель представляет собой чувствительный усилитель с низким уровнем собственных шумов, расположенный обычно непосредственно в детекторе или рядом с ним, чтобы свести к минимуму электрические наводки в проводах. Обычно через предусилитель подается и высокое напряжение на детектор. Главная часть любого предусилителя - полевой транзистор, подключенный непосредственно к электродам детектора или фотоэлектронного умножителя. Сочетание большой чувствительности транзистора и высокого напря-

жения на детекторе делает его наиболее уязвимым местом всего спектрометра. Особенно это касается полупроводниковых детекторов. При скачкообразной подаче высокого напряжения на детектор (или снятия его) полевой транзистор, как правило, выходит из строя в результате пробоя. Поэтому снимать и подавать напряжение на детектор рекомендуется плавно, без скачков. Блок питания обеспечивает плавную подачу высокого напряжения (обычно от 500 до 4000 В) со скоростью роста напряжения 50...100 В/с (такая же скорость и снятия напряжения). Большинство блоков снабжено защитой от перегрузок, а в некоторых блоках высокого класса для полупроводниковых детекторов предусмотрено аварийное отключение при повышении температуры охлаждаемого детектора до критической (при которой детектор под напряжением выходит из строя). Блоки высокого напряжения характеризуются высокой стабильностью. Усилитель предназначен для подготовки сигнала, поступающего с предусилителя, к обработке аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Спектрометрический усилитель не является обязательным элементом спектрометрического комплекса. Его не используют, если предусилитель дает сигнал необходимой амплитуды и формы. Усилитель имеет несколько регулировок усиления, постоянной времени, порога дискриминатора, компенсации нуля. Все регулировки кроме порога дискриминатора, служат для управления формой и амплитудой импульса, дискриминатор же отсекает сигналы, амплитуды которых меньше установленного порога, т.е. убирает шум, облегчая работу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и уменьшая нагрузку на спектрометр.

Для анализа проб объектов ветеринарного надзора, имеющих сложный радионуклидный состав, удобно использовать универсальный спектрометрический комплекс типа «Гамма-Плюс», «Прогресс-2000» с блоками детектирования альфа, бета и гамма-излучения и гамма-спектрометр с полупроводниковым детектором в свинцовой защите.

**Спектрометрический комплекс с программным обеспечением «Прогресс»** (рис. 17) используется более чем в 2000 лабораторий радиационного контроля в России и за рубежом. Этот комплекс используется для: измерения активности радионуклидов; измерение суммарной активности счетных образцов; измерение спектров ионизирующего излучения; определение радионуклидного состава счетных образцов.

Областью применения являются: сертификация любых видов продукции по радиационному признаку, мониторинг и радиационный контроль, обеспечение радиационной безопасности, решение исследовательских задач, связанных с измерениями радиоактивности.



Рис. 17. Спектрметрический комплекс «МУЛЬТИРАД»  
с программным обеспечением «ПРОГРЕСС»

В комплектацию входят: набор цифровых спектрометрических и радиометрических измерительных трактов, персональный компьютер с установленными программами «Прогресс» и «Таблицы ядерных данных», методики выполнения измерений, комплект радиохимических методик приготовления счетных образцов для измерения активности радионуклида стронций-90 (при необходимости), методическое обеспечение радиационного контроля питьевой воды (при наличии в составе комплекса альфа-радиометрического тракта), дополнительное оборудование: пробоотборное устройство ПУ-5; комплект оборудования для мониторинга радона, возможность поставки и сборки из нескольких измерительных блоков с одним общим блоком откачки.

Полный перечень измерительных трактов, используемых в составе установки «МУЛЬТИРАД»: альфа-радиометрический, альфа-спектрометрический, бета-спектрометрический, сцинтилляционный гамма-спектрометрический, полупроводниковый гамма-спектрометрический, альфа-радиометрический «ПРО-

ГРЕСС-БИО» для биофизических анализов, гамма-спектрометрический «СИЧ-Г», спектрометр излучения человека, бета-спектрометрический «СИЧ-Б», спектрометр излучения человека.

**Спектрометрический комплекс СКС-07П-Г-М** предназначен для проведения прецизионных измерений и исследований в области ядерной спектрометрии в полевых условиях.



Рис. 18. Спектрометрический комплекс СКС-07П-Г-М

Комплекс позволяет с высочайшей точностью определять удельную и объемную активность гамма-излучающих нуклидов низкой активности в пробах воды, продуктов питания, почвы, строительных материалов, геологических пород.

СКС-07П-Г-М (рис. 18) - самый компактный переносной спектрометрический комплекс в мире, реализованный на базе процессора импульсных сигналов семейства SBS (SBS-65, SBS-70, SBS-75), встраиваемого в переносный компьютер типа Notebook. Использование современных мощных компьютеров Notebook позволило создать спектрометрический комплекс, обладающий всеми возможностями и высокими метрологическими характеристиками, присущими прецизионным лабораторным системам. Комплекс изготавливается в обычном и промышленном (температурный диапазон: от минус 20°C до плюс 40°C, повышенная вибростойкость, ударостойкость, пылебрызгозащищенность) исполнении. Комплексы СКС – 07(09)П-Г оснащаются: сцинтилляционными детекторами на основе кристаллов NaI и CsI любых размеров и конфигураций; переносными полупроводниковыми детекторами из сверхчистого германия производства фирм EG&G Ortec (США); Canberra (США): серии GEM, GC (для диапазона энергий 40 кэВ-10 МэВ); серии GH1X, GR. GX (для диапазона энергий 3

кэВ-10 МэВ); серии LoAX, GL для спектрометрического контроля веществ ядерного топливного цикла (лантаноиды, актиноиды в диапазоне энергий 3 кэВ-400 кэВ).

Комплекс оснащается программным обеспечением, позволяющим управлять всеми функциями и параметрами спектрометра и производить обработку полученной спектрометрической информации для определения объемной, удельной или поверхностной активности радионуклидов и мощности дозы от излучения каждого из них в наиболее часто встречающихся конфигурациях. Комплекс измеряет степень обогащения урана, определяет изотопный состав плутония, измеряет активность нуклидов в транспортных контейнерах и т.д.

### **Контрольные вопросы:**

1. На какие категории можно условно разделить приборы для измерения ионизирующих излучений?
2. Как классифицируют приборы для измерения ионизирующих излучений по способу регистрации излучений?
3. Как классифицируют приборы для измерения ионизирующих излучений по виду регистрируемого излучения?
4. Как классифицируют приборы для измерения ионизирующих излучений по источнику питания?
5. Как называются приборы, предназначенные для измерения активности радиоактивных препаратов и источников излучения, для определения плотности потока или интенсивности ионизирующих частиц и квантов, поверхностной радиоактивности предметов, удельной активности аэрозолей, газов и жидкостей?
6. Из каких компонентов обычно состоит стационарный радиометр?
7. Из каких компонентов состоит радиометрическая установка «Гамма-1»?
8. В чём особенности устройства переносных (полевых) радиометров?
9. Какие приборы, измеряют экспозиционную, поглощенную и эквивалентную дозы излучения или соответствующие мощности доз?
10. На какие две группы по принципу действия можно разделить дозиметры?
11. На какие группы делят дозиметры по характеру применения?
12. Из каких элементов состоят спектрометры (гамма-спектрометрические установки)?
13. Какой комплекс используется для: измерения активности радионуклидов; измерения суммарной активности счетных образцов; измерения спектров ионизирующего излучения; определения радионуклидного состава счетных образцов?

#### 4.1. Приборы индивидуального дозиметрического контроля

К группе приборов индивидуального дозиметрического контроля относят комплекты дозиметрического контроля типа КИД-1, КИД-2 (рис. 19), ДК-0,2, ДП-23-А, ДП-22-В, ДП-24 и другие, которые снабжены переносным зарядно-измерительным или зарядным устройством. Указанные дозиметры предназначены для контроля при работе с рентгеновским и гамма-излучением. Они состоят из комплекта малогабаритных (наперстковых) ионизационных камер, внешне напоминающих авторучки. Носят их обычно в нагрудном кармане халата (карманные дозиметры).

Принцип работы дозиметров основан на разрядке ёмкости предварительно заряженной ионизационной камеры под действием ионизирующего излучения.

Величина емкостей и воздушные объёмы камер у КИД-1 подобраны таким образом, что обеспечивают диапазоны измерений в пределах 0,02 - 0,2 Р и 0,2 - 2 Р, а у КИД-2 — 0,005 — 0,05 Р и 0,05 - 1 Р. Остаточное напряжение на камере измеряют ламповым вольтметром, который вместе с устройством для зарядки камер составляет схему зарядно-измерительного устройства.

Комплект ДК-0,2 состоит из 10 дозиметров и зарядного устройства. В отличие от КИД-1 и КИД-2 он позволяет визуально судить о дозе излучения в процессе работы в любой момент по положению кварцевой нити, перемещающейся по шкале, видимой в окуляр, который смонтирован в одном корпусе с ионизационной камерой. Поэтому этот прибор называют прямопоказывающим.

Диапазон измерений составляет 0,02—0,2 Р. Погрешность градуировки по гамма-излучению в нормальных условиях  $\pm 10\%$ .

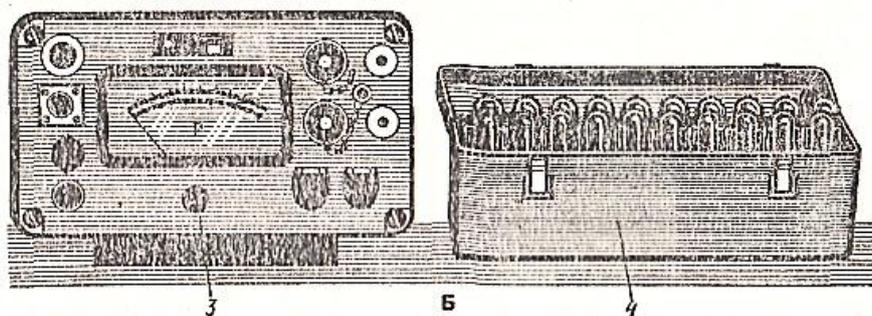


Рис. 19. Дозиметр КИД-2 - комплект индивидуальных дозиметров (3 — измерительный прибор; 4 комплект индивидуальных дозиметров)

Дозиметры ДП-22-В и ДП-24 рассчитаны на измерения больших доз. В комплект входит набор наперстковых камер ДК-50-А. Устройство и питание камер такое же, как и у ДК-0,2, т. е. они относятся к прямопоказывающим дозиметрам.

Имеются также приборы индивидуального дозиметрического контроля, чувствительным элементом которых являются люминесцентные кристаллы или фотопленки. Принцип действия индивидуальных люминесцентных дозиметров (ИЛК) основан на использовании вспышечных кристаллофосфоров. Эти фосфоры обладают свойством накапливать энергию под действием излучения пропорционально дозе, достаточно длительное время сохранять ее, а затем быстро высвечивать при дополнительном освещении таблеток инфракрасным светом. По яркости вспышки фосфора судят о дозе облучения. Величина вспышки фосфоров регистрируется фотометром с измерительной схемой, чувствительным элементом которого служит фотоэлектронный умножитель.



LANDAUER Holder Design

Фосфоры могут возбуждаться не только радиоактивными излучениями, но и видимым светом, поэтому таблетки фосфора упаковывают в светонепроницаемые кассеты.

Опτικο-стимулированный люминесцентный индивидуальный дозиметр LANDAUER InLight Basic (рис. 20)

Рис. 20. Опτικο-стимулированный люминесцентный индивидуальный дозиметр LANDAUER InLight Basic

Благодаря передовой технологии оптически стимулированной люминесценции ОСЛ (Optically Stimulated Luminescence (OSL) technology) от LANDAUER радиационный индивидуальный дозиметр InLight Basic предназначен для мониторинга накопленной дозы персонала (медицинских работников, работников АЭС, производственных работников), кто работает с источниками ионизирующего излучения. Индивидуальные Дозиметры InLight обеспечивают мониторинг рентгеновского, гамма- и бета-излучения с технологией оптически стимулированной люминесценции (OSL).

**Индивидуальный фотопленочный контроль (ИФК)** применяется довольно широко для определения безопасности при работе с гамма-излучением и основан на взаимодействии радиоактивного излучения с фотоэмульсией рентгеновской пленки. Под воздействием излучения фотопленка чернеет пропорционально дозе излучения. Почернение фотопленки измеряют с помощью фотометра или денситометра. ИФК осуществляется с помощью комплекта индивидуального дозиметрического фотоконтроля ИФКУ-1 (рис. 21).

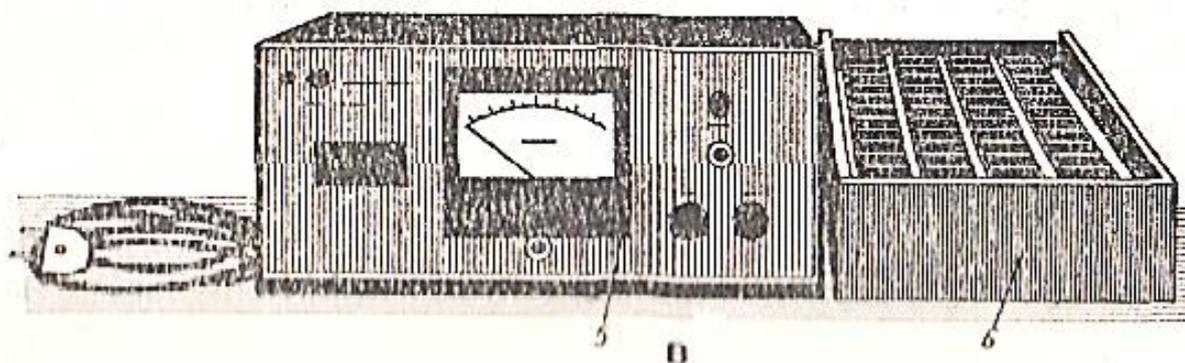


Рис. 21. Дозиметр ИФКУ-1 - комплект индивидуального дозиметрического фотоконтроля (5 - измерительный прибор, 6 - комплект кассет с фотопленками)

Фотопленку помещают в светонепроницаемую кассету и носят ее, как правило, в нагрудном кармане халата. По истечении определенного времени пленку проявляют и денситометрируют, сравнивая оптическую плотность почернения с контрольными фотопленками, облученными известной дозой гамма-излучения. Достоинство ИФК — это простота и документальность. Вместе с тем он обладает рядом недостатков: небольшой диапазон измерения доз — 0,05 - 15 Р, погрешность измерений превышает  $\pm 30\%$ , длительность обработки пленки не позволяет быстро определить полученную дозу сразу после работы.

Дозиметры ИФК-2,3 (рис. 22) снабжены фильтрами-поглотителями гамма- и бета-излучений и дают возможность приближению оценивать, энергию гамма-излучения, что существенно для последующего расчета доз, поглощенных в критических органах. Конструкция кассеты ИФК-2,3 позволяет использовать ее также для контроля интегральной дозы облучения тепловыми и быстрыми нейтронами. Внутри кассета (дозиметр) имеет 4 секции. Одна секция — сквозное окно, в трех остальных установлены свинцовые фильтры толщиной 0,75 мм с прокладкой из гетинакса, алюминия толщиной 2,0 мм с прокладкой из гетинакса и гетинакса. Кассеты заряжаются рентгеновской пленкой РМ-5-1, РМ-5-4, РМ-5-3 или «Агфа».



Рис. 22. Дозиметр ИФК-2

Диапазон измерений: 1. Индивидуальных доз рентгеновского и гамма-излучений с энергиями 0,02—3 МэВ в диапазоне 0,01—50 Р (с точностью  $\pm 20\%$ ); 2. Потока бета-частиц в диапазоне энергий 0,2—3,5 МэВ — в интервале 0,05—2,0 рад (с точностью  $\pm 20\%$  в отсутствии гамма-излучения и  $+40\%$  при наличии сопутствующего гамма-излучения).

**Комплекс дозиметрический термолюминесцентный "ДОЗА-ТЛД"** (рис. 23)



Рис. 23. Комплекс дозиметрический термолюминесцентный "ДОЗА-ТЛД"

Установка "ДОЗА-ТЛД" в комплекте с разными типами индивидуальных термолюминесцентных дозиметров обеспечивает проведение индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внешнего облучения фотонным и нейтронным излучением, а также определение доз в коже лица, пальцев рук и хрусталике глаза. Считывающее устройство установки совмещено с ПЭВМ, к которой через стандартные разъемы подсоединяются монитор, клавиатура, принтер и мышь.

**Индивидуальные термолюминесцентные дозиметры** (рис. 24).



Рис. 24. Индивидуальные термолюминесцентные дозиметры

Принцип работы дозиметров основан на накоплении энергии детекторами под действием ионизирующего излучения. Накопленная энергия при нагревании детектора в установке ДВГ-02ТМ, Доза-ТЛД освобождается в виде светового излучения, которое регистрирует электронное устройство установки.

## Персональные прямопоказывающие дозиметры фотонного излучения «Arrow-Tech» (рис. 25).



Рис. 25. Персональные дозиметры фотонного излучения «Arrow-Tech»

Надежный индивидуальный дозиметр гамма- и рентгеновского излучения для персонала радиоизотопных лабораторий, дефектоскопистов, сотрудников АЭС, таможенных работников и т.д. Колпачок для подсветки обеспечивает считывание результатов измерения без направления дозиметра в сторону источника света.

## Дозиметр рентгеновского излучения ДКР-04М (рис. 26)



Рис. 26. Дозиметр рентгеновского излучения ДКР-04М

Дозиметр для оперативного индивидуального дозиметрического контроля персонала, работающего с источниками рентгеновского излучения и низкоэнергетических гамма-квантов.

## Индивидуальный дозиметр гамма-излучения ДКГ-05Д (рис. 27)



Рис. 27. Индивидуальный дозиметр гамма-излучения ДКГ-05Д

Прямопоказывающий электронный дозиметр для контроля дозовой нагрузки на персонал радиационно-опасных объектов, рассчитанный на жесткие условия эксплуатации. Может использоваться автономно или в составе автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля предприятия.

### Индивидуальный дозиметр гамма и нейтронного излучения ДВС-02Д (рис. 28)



Рис. 28. Индивидуальный дозиметр гамма и нейтронного излучения ДВС-02Д

Прямопоказывающий гамма-нейтронный дозиметр, разработанный для жестких условий эксплуатации. Принцип регистрации нейтронов позволяет корректно рассчитывать полученную дозу независимо от спектра нейтронного излучения.

### Индивидуальные дозиметры рентгеновского и гамма-излучений ДКГ-PM1621/PM1621A (рис. 29)



Рис. 29. Индивидуальные дозиметры рентгеновского и гамма-излучений ДКГ-PM1621/PM1621A

Индивидуальные дозиметры с широкими диапазонами измерения дозы и мощности дозы. Закрепляются в нагрудном кармане или на поясе.

### Дозиметр индивидуальный ДКГ-АТ2503, АТ2503А (рис. 30)



Рис. 30. Дозиметр индивидуальный ДКГ-АТ2503, АТ2503А

Микропроцессорный прямопоказывающий индивидуальный дозиметр. Совместно с устройством считывания, подключаемым к ПЭВМ, обеспечивает создание системы автоматизированного контроля дозовых нагрузок на персонал.

### Дозиметр индивидуальный ДКС-АТ3509/АТ3509А/АТ3509В/АТ3509С (рис. 31)



Рис. 31. Дозиметр индивидуальный ДКС-АТ3509/АТ3509А/АТ3509В/АТ3509С

Микропроцессорный прямопоказывающий индивидуальный дозиметр. Совместно с устройством считывания, подключаемым к ПЭВМ, обеспечивают создание системы автоматизированного контроля дозовых нагрузок на персонал.

### Контрольные вопросы

1. На чём основана работа группы приборов индивидуального дозиметрического контроля типа КИД-1, КИД-2, ДК-0,2, ДП-23-А, ДП-22-В, ДП-24?
2. На чём основана работа люминесцентных или фотопленочных приборов индивидуального дозиметрического контроля?
3. На чём основана работа термолюминесцентных дозиметров индивидуального дозиметрического контроля?
4. В чём особенность считывания результатов измерения без направления дозиметра в сторону источника света у дозиметра рентгеновского излучения ДКР-04М?

### 5. Основные методы измерения радиоактивности

Радиоактивность препаратов можно определить абсолютным, расчетным и относительным (сравнительным или эталонным) методами. Наиболее широкое практическое применение имеет относительный метод.

**Абсолютный метод** основан на применении прямого счета полного числа частиц распадающихся ядер в условиях  $4\pi$ -геометрии (четырёхпийной). В этом случае активность препаратов выражается не в импульсах в минуту, а в единицах радиоактивности — Ки, мКи, мкКи. Для этих целей используют  $4\pi$ -счетчики, конструкция которых позволяет поместить измеряемый образец внутрь счетчика (газопоточный счетчик, сцинтилляционный счетчик с растворением пробы в жидком сцинтилляторе или помещением пробы внутрь его и др.). При работе с  $4\pi$ -счетчиком отпадает необходимость введения поправок.

**Расчетный метод** определения абсолютной активности альфа- и бета-излучающих изотопов заключается в том, что измерение осуществляется при помощи обычных газоразрядных или сцинтилляционных счетчиков.

Чтобы сопоставить скорость счета, выраженную в импульсах в минуту, с активностью в единицах кюри вводят в результаты измерения ряд поправочных коэффициентов, учитывающих потери излучения при радиометрии.

Общая формула для определения абсолютной активности (А) расчетным методом имеет следующий вид:

$$A (\text{Ки}) = N / \omega \varepsilon k p q r \gamma t \cdot 2,22 \cdot 10^{12}$$

где  $N$  — скорость счета в имп/мин за вычетом фона;  $\omega$  - поправка на геометрические условия измерения (телесный угол);  $\varepsilon$  - поправка на разрешающее время счетной установки;  $k$  - поправка на поглощение излучения в слое воздуха и окне (стенке) счетчика;  $p$  - поправка на самопоглощение в толще препарата;  $q$  - поправка на обратное рассеяние от подложки;  $r$  - поправка на схему распада;  $\gamma$  - поправка на гамма-излучение при смешанном излучении;  $t$  - навеска измеряемого препарата в мг,  $2,22 \cdot 10^{12}$  - переводной коэффициент от числа распадов в минуту к кюри ( $1 \text{ Ки} = 2,22 \cdot 10^{12}$  расп/мин).

Для определения удельной активности указанная формула принимает следующее выражение:

$$A (\text{Ки/кг}) = N \cdot 1 \cdot 10^6 / \omega \varepsilon k p q r \gamma t \cdot 2,22 \cdot 10^{12},$$

где  $1 \cdot 10^6$  - переводной коэффициент на 1 кг при измерении  $t$  в мг.

Большую часть поправочных коэффициентов выводят путем расчета, что и составляет основную трудоемкость этого метода.

Смысл каждой из поправок и способ их вычисления следующий.

*Поправку на геометрию счета ( $\omega$ )* вычисляют для учёта тех излучений, которые вылетели из препарата, и не смогли попасть в чувствительный объём счётчика.

*Поправку на разрешающее время счетной установки ( $\varepsilon$ )* рассчитывают для учёта тех излучений, которые попали в чувствительный объём счётчика в его «мертвое время».

*Поправку на поглощение ионизирующего излучения слоем воздуха и окном счетчика ( $k$ )* вычисляют для учёта тех излучений, которые задерживаются слоем воздуха между препаратом и чувствительным объемом счетчика материалом окна счётчика (взаимодействуют с атомами, передавая им свою энергию).

*Поправку на самопоглощение излучения в препарате ( $p$ )* вводят для учёта тех излучений, которые задерживаются слоем препарата и материалом чувствительного объема счетчика (за счёт взаимодействия с атомами препарата, передавая им свою энергию). Величина поправки зависит от толщины слоя приготовленного препарата. Поправку ( $p$ ) можно не вводить при измерениях в тонком и толстом слоях. Если препарат нанесен в промежуточном слое, то поправку на самопоглощение ( $p$ ) вычисляют по специальной формуле:

*Поправка на обратное рассеяние ( $q$ )* указывает, во сколько раз скорость счета от препарата на той или иной подложке выше, чем скорость счета от того же препарата без подложки. Таким образом, эту поправку вносят потому, что часть излучений, испускаемых препаратом в сторону подложки, отражается от нее, и некоторое количество отраженных частиц (которые не должны были попасть в чувствительный объем счетчика) попадает в счетчик.

*Поправка на схему распада ( $g$ )* для чистых излучателей, например, бета-излучателей ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$  и других), у которых выход  $\beta$ -частиц составляет 100%, равна единице. Когда бета-излучение равно не 100%, а, например, 88%, как у  $^{40}\text{K}$ , то  $g = 0,88$ , так как у  $^{40}\text{K}$  12% ядер распадается по К-захвату.

*Поправку на гамма - излучение* учитывают при измерении активности смешанных излучателей, когда наряду с частицами выделяются и  $\gamma$ -кванты. Например,  $^{60}\text{Co}$  имеет 100% бета-излучения, однако в этом случае происходит и гамма-излучение, которое тоже нужно учитывать.

**Относительный (сравнительный) метод определения радиоактивности** основан на сравнении активности исследуемого препарата с активностью стандартного препарата (эталоны), содержащего известное количество изотопа. Достоинство относительных измерений в их простоте, оперативности и удовлетворительной достоверности.

Благодаря этому относительный метод нашел широкое применение в практической радиометрии и в научных исследованиях с использованием радиоактивных изотопов.

Для правильного проведения измерений относительной активности исследуемых препаратов необходимо, чтобы схема распада, вид и энергия излучения эталона существенно не отличались от исследуемого радионуклида. Идеальным эталоном был бы радиоизотоп, одноименный с изотопом, содержащимся в измеряемом препарате.

Желательно иметь для эталона долгоживущий радиоактивный изотоп, так как его можно использовать длительное время без внесения поправок на распад. При определении суммарной бета-активности в объектах ветнадзора в ка-

честве эталона применяют  $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{234}\text{Th}$  и др.

Эталон и исследуемые препараты должны иметь одинаковую форму, площадь и толщину активного слоя, их одинаково располагают относительно счетчика. Подложки, на которые нанесены измеряемые препараты и эталон, должны быть выполнены из одинакового материала и иметь одинаковую толщину. Все измерения надо проводить на одной установке с одним и тем же счетчиком. Следует стремиться к тому, чтобы измерения всех препаратом были выполнены с одинаковой статистической точностью.

Измерив скорость счета  $N_{\text{э}}$  от эталона и препарата  $N_{\text{пр}}$  рассчитывают активность препарата  $A_{\text{пр}}$  в распадах и минуту по формуле:

$$A_{\text{пр}} = A_{\text{э}} N_{\text{пр}} / N_{\text{э}}$$

## Список использованной литературы

1. Александер П., Бак З. Основы радиобиологии. М.: Изд-во: Иностранной литературы, 1963. 500 с.
2. Анненков Б.Н., Аверин В.С. Ведение сельского хозяйства в районах радиоактивного загрязнения (радионуклиды в продуктах питания). Мн.: Пропплеи, 2003. 11 с.
3. Архангельский В.И., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена: учеб. пособие для вузов. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. 352 с.
4. Бекман И.Н. Измерение ионизирующих излучений: курс лекций. М., 2006. – Режим доступа: <http://profbeckman.narod.ru/radiometr.htm>
5. Радиобиология / А.Д. Белов, В.А. Киршин, Н.П. Лысенко, В.В. Пак, Л.В. Рогожина; под ред. А.Д. Белова. М.: Колос, 1999. 383 с.
6. Белов А.Д., Косенко А.С., Пак В.В. Радиационная экспертиза объектов ветеринарного надзора. М.: Колос, 1995. 159 с.
7. Белов А.Д., Косенко А.С., Пак В.В. Радиационная экспертиза объектов ветеринарного надзора: учеб. пособие для с.-х. вузов по спец. "Ветеринария". М.: Колос, 1995. 159 с.
8. Бесядовский Р.А., Иванов К.В., Козюра А.К. Справочное руководство для радиобиологов. М.: Изд-во Атомиздат, 1978. 128 с.
9. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных / В.А. Бударков, А.С. Зенкин, В.Ф. Боченков и др.; под ред. В.А. Бударкова, А.С. Зенкина. М.: КолосС, 2013. 351 с.
10. Бударков В.А., Киршин В.А., Антоненко А.Е. Радиобиологический справочник. Мн.: Ураджай, 1992. 336 с.
11. Гребенюк А.Н., Стрелова О.Ю., Легеза В.И. Основы радиобиологии и радиационной медицины: учеб. пособие. М.: Из-во «Фолиант», 2015. 232 с.
12. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии: учебник для вузов. Киев: Изд-во УСХА, 1991. 328 с.
13. Гутько В.И., Герасимович Н.В., Пухтеева И.В. Лабораторный практикум по радиобиологии. Ч. 1. Физико-дозиметрические основы радиобиологии. Мн.: Изд-во Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, 2004. 15 с.
14. Ильин Л.А., Коренков И.П. Радиационная безопасность и защита. М.: Медицина, 1996. 336 с.
15. Киршин В.А., Бударков В.А. Ветеринарная противорадиационная защита. М.: Агропромиздат, 1990. 207 с.

16. Киршин В.А., Бударков В.А. Ветеринарная противорадиационная защита. М.: Агропромиздат, 1990. 207 с.
17. Комплект индивидуальных фотопленочных дозиметров ИФК-2,3. – Режим доступа: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=2&topic=100>
18. Кузин А.М., Каушанский Д.А. Прикладная радиобиология. М: Энергоиздат, 1981. 222 с.
19. Лурье А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология. М.:МСХА, 1999. 219 с.
20. Лысенко Н.П., Пак В.В., Рогожина Л.В. Радиобиология: учебник. 2е изд., испр. СПб.: Изд-во Лань, 2012. 576 с.
21. Лысенко Н.П., Пак В.В. Практикум по радиобиологии. М.: Изд-во: КолосС, 2007. 400 с.
22. Лысенко Н.П., Пастернак А.Д., Рогожина Л.В., Павлов А.Г. Ведение животноводства в условиях радиоактивного загрязнения среды: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2005. 240 с.
23. Орлов Б.Н., Казаков А.В. Биологические основы действия электромагнитных излучений на организм / под ред. Б.Н. Орлова. Н. Новгород: Изд-во НГСХА, 2009. 241 с.
24. Оптико-стимулированный люминесцентный индивидуальный дозиметр LANDAUER InLight Basic. Режим доступа: <https://ppbrom.com/p940121805-otptiko-stimulirovannyj-lyuminestsentnyj.html><https://ppbrom.com/p940121805-otptiko-stimulirovannyj-lyuminestsentnyj.html>
25. Перцов Л.А. Ионизирующие излучения биосферы. М., Атомизда, 1973. 288 с.
26. Практикум по ветеринарной радиобиологии / А.Д. Белов, А.С. Косенко, В.В. Пак и др. М.: Агропромиздат, 1988. 240 с.
27. Практикум по ветеринарной радиобиологии [Электронный ресурс] / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер, ин-т; сост.: Н.И. Мармулева, В.А. Понуровский, Е.Л. Дзю, Н.Н. Подзорова. Новосибирск: НГАУ, 2013. 90 с. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/516042>
28. Скоробогатько Л.М. Практикум по радиоэкологии. Курск: Изд-во КГСХА, 1997. 147 с.
29. Фокин А.Д., Лурье А.А., Торшин С.П. Сельскохозяйственная радиология. СПб.: Лань, 2011. 416 с.
30. Циммер К. Проблемы количественной радиобиологии. М.: Госатомиздат, 1962. 100 с.
31. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2004. 548 с.

## Содержание

Введение .....	3
1. Единицы измерения в дозиметрии.....	4
2. Методы обнаружения и регистрации ионизирующих излучений.....	8
2.1. Детекторы на основе первичных эффектов взаимодействия ионизирующих излучений с атомами среды .....	8
2.1.1. Вольт-амперная характеристика ионизационного детектора .....	10
2.1.2. Счётчики, работающие в области плато ионизационной камеры .....	12
2.1.3. Счётчики, работающие в области пропорциональности .....	13
2.1.4. Счётчики, работающие в области Гейгера — Мюллера .....	15
2.2. Детекторы на основе сцинтилляций (люминесцентные методы .....	20
регистрации излучений).....	20
2.3. Детекторы на основе полупроводников (ПП) .....	23
2.4. Детекторы на основе диэлектриков.....	26
3. Детекторы на основе вторичных эффектов ионизирующих излучений с атомами среды ...	28
3.1. Химические детекторы.....	28
3.2. Калориметрические детекторы .....	31
3.3. Фотографические детекторы, автордиография.....	33
4. Приборы для измерения излучений и их назначение .....	36
4.1. Приборы индивидуального дозиметрического контроля .....	51
5. Основные методы измерения радиоактивности .....	57
Список использованной литературы .....	61

Учебное издание

Елена Владимировна Крапивина  
Дмитрий Валерьевич Иванов  
Владимир Владимирович Семенютин

## **ВЕТЕРИНАРНАЯ РАДИОБИОЛОГИЯ**

# **УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Учебное пособие

Редактор Павлютина И.П.

---

Подписано к печати 26.06.2020 г. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$   
Бумага печатная Усл. п. л. 3,72. Тираж 30. Изд. №6667.

---

243365 Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино  
Издательство Брянского государственного аграрного университета