

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

H. I. Штейнбок

СОДЕРЖАНИЕ

I. Основные положения

§ 1.	Введение	232
§ 2.	Принципиальные пути использования радиоактивных излучений в измерительной технике	233
§ 3.	Принципиальная схема ионизационных приборов с радиоактивным ионизатором	234
§ 4.	Вольтамперная характеристика ионизационных камер	235
§ 5.	Экономерности действия α -ионизационных камер	238
§ 6.	Флуктуации ионизационного тока и определение необходимого количества радиоактивного вещества	239
§ 7.	Основные типы ионизационных камер	244
§ 8.	Эффективность ионизационных камер	246
§ 9.	Высокоомные сопротивления	248
§ 10.	Измерение и усиление ионизационных токов	250
§ 11.	Основные схемы включения ионизационных камер, их особенности и область применения	252
§ 12.	Терминология	257

II. Применение радиоактивных излучений в измерительной технике

§ 1.	Вводные замечания	258
§ 2.	Группа приборов, основанных на изменении свойств газовой среды	260
а)	Приборы, основанные на изменении подвижности, рекомбинации и интенсивности излучения	260
б)	Приборы, основанные на изменении интенсивности излучения при переменном составе или переменной плотности среды	267
§ 3.	Группа приборов, основанных на изменении размеров ионизационных камеры или положения источника радиоактивного излучения при постоянном составе и постоянной плотности среды	270
а)	Приборы, основанные на изменении размеров ионизационных камеры	272
б)	Приборы, основанные на изменении положения источника излучения относительно ионизационных камер	274
§ 4.	Группа приборов, основанных на изменении свойств радиоактивных излучений	275
а)	Приборы, основанные на поглощении β - и γ -лучей	277
б)	Приборы, основанные на рассеянии β - и γ -лучей	281

I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

§ 1. Введение

Использование радиоактивных веществ для решения различных научно-технических задач приобрело в настоящее время важное народнохозяйственное значение в связи со значительным развитием атомной промышленности, производящей радиоактивные вещества во всё возрастающих количествах.

Следует иметь в виду, что при производстве плутония остаются большие количества побочных радиоактивных продуктов и их изотопов, ждущих своего промышленного использования⁵.

Радиоэлементы, кроме известных применений в медицине, а так же для производства светящихся составов и дефектоскопии, в настоящее время используются в основном по двум направлениям:

1) В качестве «меченых атомов» при химических, физических, биологических и научно-технических исследованиях. В этой области уже достигнуты значительные успехи, в результате которых метод «меченых атомов» в ряде случаев существенно превосходит другие методы исследований как по чувствительности, так и по точности^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 22, 77, 78, 81}. Применение метода «меченых атомов» привело советских учёных к ряду важных открытий в области биологии, агробиологии и химии⁴.

2) В качестве постоянно действующих портативных источников радиоактивных излучений больших энергий в различного рода новых автоматических приборах для исследования и контроля производственных и технологических процессов^{5, 6, 7, 8, 13, 14, 77}.

Благодаря природным свойствам радиоактивных веществ радиоактивные ионизаторы в отличие от других ионизаторов не требуют специального ухода и затраты дополнительной энергии. Для изготовления одного прибора необходимо лишь от 1 до 100 микрокюри радиоактивного вещества.

Успехи физики в области исследования и использования внутриватомной энергии не могли не сказаться на интересе техников к данному вопросу. Этому же способствует быстрое развитие таких отраслей техники, как электровакуумная, электроизмерительная, электроизолирующих материалов и др. Если до 1941 г. возможности применения радиоактивных излучений в измерительной технике были мало известны, то в настоящее время картина изменилась, и уже известно много приборов, основанных на использовании α -, β - и γ -излучений радиоактивных веществ.

В настоящей статье рассматриваются основные вопросы применения радиоактивных излучений в измерительной технике.

§ 2. Принципиальные пути использования радиоактивных излучений в измерительной технике

Принципиальные пути использования радиоактивных излучений в измерительной технике определяются способностью этих излучений ионизовать газ, причём имеют место типичные зависимости числа образующихся ионов от природы и плотности газовой среды, а также от пробега, поглощения и рассеяния ионизующих излучений^{18, 19}.

Существует ряд методов исследования и измерения интенсивности ионизующего излучения, основанных на его ионизационном^{20, 21}, фотографическом⁴² и сцинтилляционном^{40, 41} действиях, поглощении¹⁸, возникновении разряда под действием излучения^{20, 23, 24, 25}, изменении проводимости некоторых полупроводников и, наконец, конденсации пара на ионах^{26, 80}.

Наиболее простым, точным и удобным из них, пригодным для конструирования и изготовления различных серийных приборов, является ионизационный метод. В случае достаточно интенсивной ионизации измерение ионизационных токов производится при помощи ионизационных камер, в случае же слабой ионизации — при помощи ионизационных и сцинтилляционных счётчиков.

Следует, однако, заметить, что обычно оказывается значительно выгоднее идти по пути увеличения количества радиоактивных веществ, применяемых в приборах, и пользоваться ионизационными камерами, чем дорогой и громоздкой счётной аппаратурой, используемой при малых количествах радиоактивных веществ.

Учитывая имеющуюся в приборостроении тенденцию к уменьшению размеров и веса приборов и ввиду этого желательность конструирования чувствительных систем (датчиков) небольших размеров, наиболее целесообразно применять во многих случаях α -излучение, обладающее наивысшей ионизющей способностью на 1 см пробега. Однако при конструировании ряда приборов, например приборов для измерения давлений газов порядка десятков или тысяч атмосфер, уровней жидкости порядка метров, толщины материалов и т. п., необходимо применять β - и γ -лучи.

Эти соображения кладутся в основу выбора вида радиоактивного излучения. При выборе радиоактивного вещества необходимо руководствоваться также продолжительностью жизни радиоэлемента.

Среди известных в настоящее время около 800 радиоактивных элементов и их изотопов^{15, 16, 17} только небольшая часть удовлетворяет указанным выше условиям.

§ 3. Принципиальная схема ионизационных приборов с радиоактивным ионизатором

Типичная схема ионизационного прибора с радиоактивным ионизатором, помещённым внутри камеры, приведена на рис. 1, изображающем ионизационную камеру для измерения давления газов. В этой схеме последовательно с ионизационной камерой включены источник э. д. с. E и высокоомное сопротивление R , на котором ионизационный ток создаёт падение напря-

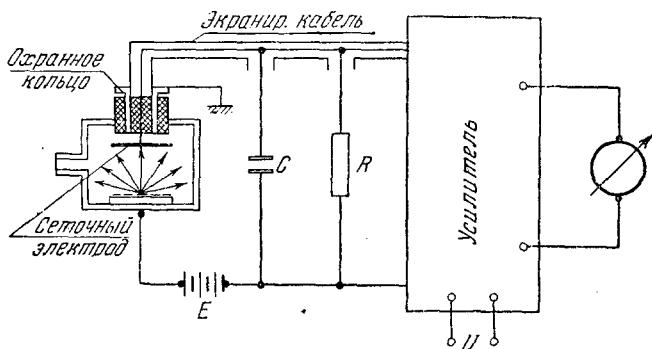


Рис. 1. Принципиальная схема ионизационного прибора с радиоактивным ионизатором, расположенным внутри ионизационной камеры.

жения, пропорциональное измеряемому давлению газов; под ёмкостью C понимается распределённая ёмкость всей схемы, слагающаяся из ёмкостей камеры, лампы и соединительных проводов. Падение напряжения на сопротивлении R подаётся на вход электрометрического усилителя. При необходимости дальнейшего усиления по напряжению и мощности выход электрометрического усилителя соединяют с последующими каскадами усиления. Шкала измерителя градуируется непосредственно в единицах измеряемого давления. Для измерения других неэлектрических величин конструкция ионизационной камеры соответственно видоизменяется.

Для исключения влияния всевозможных внешних наводок и облегчения экранирования приборов ионизационные камеры монтируют часто в одном корпусе с усилителем или, во всяком случае, с первым каскадом усиления. Потенциалы корпуса и отдельных точек схемы подбираются так, чтобы уменьшить до предела паразитные ионизационные токи, которые могут возникнуть внутри корпуса благодаря ионизации, создаваемой радиоактивными загрязнениями и космическими лучами. Другой важной мерой предосторожности для точной работы ионизационных при-

боров является осушение воздуха внутри ионизационной камеры и в зоне расположения электрометрической лампы.

Важнейшими элементами любого ионизационного прибора являются: ионизационная камера с радиоактивным ионизатором, высокое сопротивление и усилитель ионизационных токов.

§ 4. Вольтамперная характеристика ионизационных камер

Первостепенное значение для использования радиоактивных излучений в измерительной технике имеют вопросы прохождения тока через газ, находящийся в зоне радиоактивного излучения.

Если покрыть тонким слоем радиоактивного вещества один из двух или оба электрода, изолированных друг от друга газовым промежутком, и приложить к ним некоторую разность потенциалов, то в цепи возникает ионный ток, величина которого является сложной функцией количества радиоактивного вещества,

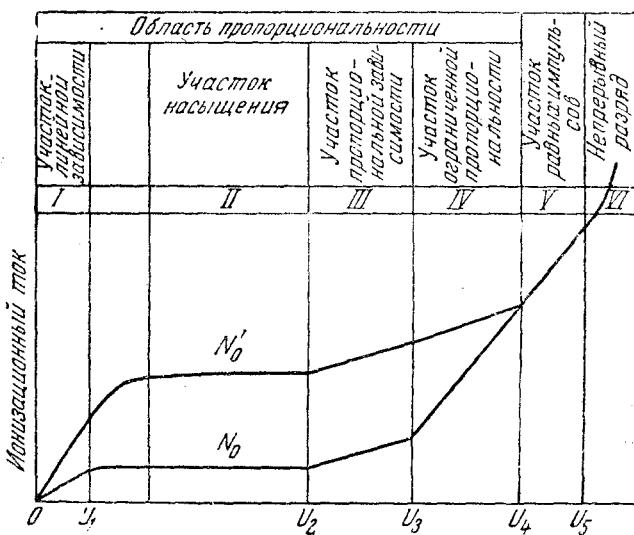


Рис. 2. Вольтамперные характеристики ионизационных камер при двух значениях интенсивности излучения N_0 и N'_0 .

приложенного напряжения, плотности и состава среды, наполняющей ионизационную камеру.

При постоянном составе и постоянной плотности газа, заполняющего ионизационную камеру, зависимости ионизационных токов от приложенного напряжения для различных интенсивностей излучения N_0 и N'_0 имеют вид, изображённый на рис. 2. Для этих графиков характерны несколько участков: линейный уча-

сток I , участок насыщения II и участки несамостоятельного и непрерывного разряда $III - VI$. Участки I и II наиболее устойчивы и нашли применение в технике измерения неэлектрических величин; участки $III - V$ используются для конструирования ионизационных счётчиков. На участке I ионный ток зависит от подвижности, рекомбинации и числа ионов, а также от приложенного напряжения. На участке II ток определяется исключительно полным числом ионов, создаваемых в объёме камеры ионизующим агентом.

Зависимость ионизационного тока I от напряжения U является сложной функцией многих переменных и не может быть выражена просто.

Уравнения баланса концентраций ионов (положительных n_1 и отрицательных n_2) для стационарного состояния в случае плоской камеры имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} N_0 &= \alpha n_1 n_2 + k_1 \frac{d}{dx} (n_1 E) - D_1 \frac{d^2 n_1}{dx^2}, \\ N_0 &= \alpha n_1 n_2 - k_2 \frac{d}{dx} (n_2 E) - D_2 \frac{d^2 n_2}{dx^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Уравнения (1) выражают равновесие концентраций ионов в результате одновременно идущих процессов ионизации (N_0) и исчезновения ионов вследствие рекомбинации ($\alpha n_1 n_2$), уноса электрическим полем ($k \frac{d}{dx} (nE)$) и диффузии ($-D \frac{d^2 n}{dx^2}$).

Истинное поле внутри ионизационной камеры в присутствии объёмного заряда определяется уравнением Пуассона

$$-\frac{dF}{dx} = 4\pi e (n_1 - n_2). \quad (2)$$

Ионизационный ток с учётом диффузии ионов находится из уравнения

$$I = eS \left[(k_1 n_1 + k_2 n_2) E + D_1 \frac{dn_1}{dx} - D_2 \frac{dn_2}{dx} \right]. \quad (3)$$

Здесь k_1 и k_2 , D_1 и D_2 — подвижности и коэффициенты диффузии ионов, e — их заряд, E — напряжённость электрического поля и S — площадь электродов ионизационной камеры.

Строгого решения уравнения (1) — (3) не имеют. Некоторые авторы (см., например, 20, 21, 25) решили эту задачу приближённо для случая отсутствия диффузии ионов. Ниже приводится одно из этих решений для бесконечно большого плоского конденсатора и однородной ионизации:

$$U = IR_0 \left(1 + C_1 \frac{I}{I_\infty} \right) \text{ при } \frac{I}{I_\infty} < 0,6 \quad (4)$$

и

$$U = \frac{IR_0}{\sqrt{1 - \frac{I}{I_\infty}}} \quad \text{при} \quad \frac{I}{I_\infty} > 0,94, \quad (5)$$

где C_1 — постоянная, равная для воздуха 1,05, I_∞ — ток насыщения и R_0 — сопротивление ионизационной камеры при $I \rightarrow 0$. Приведённое решение Зеелигера, а также похожее на него решение Ми^{20, 21} описывают вольтамперную характеристику не полностью, а по участкам, для предельных случаев.

Пренебрегая, кроме диффузии ионов, также объёмным зарядом, что при небольшой интенсивности излучения допустимо, мы получили строгое решение уравнений (1) для бесконечно большого плоского конденсатора и однородной ионизации, которое полностью описывает вольтамперную характеристику между точками OJ_2 (рис. 2):

$$\frac{I}{I_\infty} = \frac{\sqrt{\frac{R^2}{R_0^2} - 1}}{\frac{R}{R_0^2} \operatorname{arcctg} \sqrt{\frac{R^2}{R_0^2} - 1}}. \quad (6)$$

Здесь R — сопротивление ионизационной камеры, равное $\frac{U}{I}$, и R_0 — сопротивление ионизационной камеры на линейном участке вольтамперной характеристики при $I \rightarrow 0$:

$$R_0 = \frac{h}{2eS} \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 N_0}}, \quad (7)$$

где h — расстояние между электродами, S — площадь электродов, α — коэффициент рекомбинации ионов, k_1 и k_2 — подвижности ионов, N_0 — число пар ионов, создаваемых ионизатором в единице объёма за единицу времени, и e — заряд иона.

Принимая в слабых полях $\operatorname{arcctg} \sqrt{\frac{R^2}{R_0^2} - 1}$ равным $\frac{\pi}{2}$ и в сильных полях равным $\frac{R}{R_0}$, получаем из (6) приближённые решения:

$$U = IR_0 \left(1 + C_2 \frac{I^2}{I_\infty^2} \right) \quad \text{при} \quad \frac{I}{I_\infty} < 0,6, \quad (8)$$

где C_2 — постоянная, равная единице, и

$$U = \frac{IR_0}{\sqrt{1 - \frac{I^2}{I_\infty^2}}} \quad \text{при} \quad \frac{I}{I_\infty} > 0,94. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9), близкие по форме к (4) и (5), отличаются от них квадратом при I и лучше согласуются с опытом, но крайней мере при интенсивностях излучения менее 100 микрорентген.

§ 5. Закономерности действия α -ионизационных камер

Знакомство с вопросом о влиянии интенсивности излучения, плотности среды, состава газов, размеров камеры, скорости течения газа и др. на ход вольтамперных характеристик имеет важное значение для оценки возможностей применения ионизационного метода в измерительной технике. До последнего времени каждый случай рассматривался отдельно на основании наблюдаемых на опыте вольтамперных характеристик, вследствие чего не было видно связи между ними и, естественно, не могли быть сделаны необходимые обобщения.

Исходя из выражения (7), нами установлена общая закономерность, которая может быть сформулирована следующим образом: произведение тока насыщения I_∞ на квадрат начального сопротивления R_0 ионизационной камеры есть величина постоянная для данных размеров ионизационной камеры и газа, наполняющего камеру.

В самом деле, производя простые преобразования (7), получаем:

$$R_0 = \sqrt{\frac{ah^3}{4ek_1k_2S}} \cdot \sqrt{\frac{1}{ehSN_0}}.$$

Учитывая, далее, что $ehSN_0$ есть ток насыщения I_∞ , получаем после дальнейших преобразований:

$$I_\infty R_0^2 = \Omega, \quad (10)$$

где

$$\Omega = \frac{a}{4ek_1k_2} \frac{h^3}{S}. \quad (11)$$

Закономерность (10) не зависит от интенсивности излучения и устанавливает простую связь, существующую между начальным сопротивлением R_0 и током насыщения I_∞ . Указанная закономерность проверена на основании обширных экспериментальных данных⁷⁶ и хорошо подтверждается для ионизационных токов, созданных α -излучением, по крайней мере в пределах от 10 до 1000 CGSE. Это показывает, что закономерность (10) имеет место и за границей справедливости её вывода, т. е. при неоднородной ионизации, создаваемой α -лучами. Однако в этом случае при подсчёте постоянной Ω необходимо учитывать угловое распределение вылетающих α -частиц.

При исследовании α -ионизационных камер, например при изменении расстояния между электродами или при создании в камере больших давлений, возможны случаи, когда пробег α -частиц L становится меньше размера h , а ток насыщения остаётся постоянным, несмотря на изменение R_0 . Возможны и другие случаи, например при создании в камерах давлений газов, меньших атмосферного, когда R_0 остаётся постоянным, а ток насыщения изменяется. Все эти аномалии могут быть хорошо объяснены анализом соотношения (10).

Исходя из (7) и (10) и учитывая указанные выше особенности α -ионизационных камер, а также экспериментальные данные, нами составлена таблица I, в которой сведены закономерности действия α -ионизационных камер и в наглядной форме показаны изменения вида вольтамперных характеристик, начального сопротивления R_0 и тока насыщения в зависимости от изменения различных факторов. В той же таблице указана и область применения α -ионизационного метода в измерительной технике. Закономерности действия α -ионизационных камер, за исключением № 4 и 8, оказываются с некоторым приближением пригодными и при использовании β -лучей, но, естественно, при других пределах.

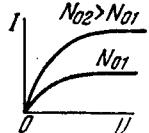
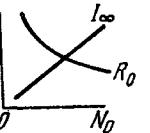
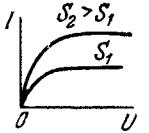
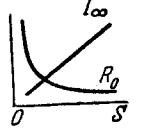
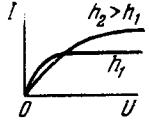
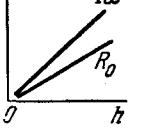
§ 6. Флуктуации ионизационного тока и определение необходимого количества радиоактивного вещества

Число α - и β -частиц или γ -квантов, испускаемых радиоактивными веществами, не одинаково в равные промежутки времени и подвержено статистическим колебаниям около некоторого среднего значения. При малости среднего числа частиц, испускаемых в одну секунду, отдельные значения могут заметно отличаться от среднего, вызывая видимые на приборе колебания ионизационного тока. При большой чувствительности электрической схемы и измерении малых изменений ионизационного тока флуктуации порядка десятых процента, происходящие с малой частотой, делают уже почти невозможным отсчёт показаний. Поэтому уменьшение флуктуаций ионизационного тока до величины, определяемой точностью измерения, является совершенно необходимым элементом расчёта приборов.

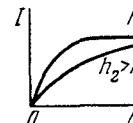
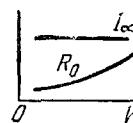
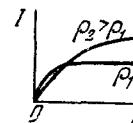
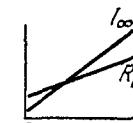
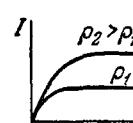
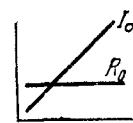
Вопрос о влиянии флуктуации числа ионизующих частиц на показания ионизационных приборов рассматривался многими авторами. Мы приводим в несколько видоизмененном виде решение, данное И. Я. Баритом и М. И. Подгорецким^{20, 27} для случая ионизации α -частицами, исходящими из стенки плоской камеры, когда время сорбции ионов мало по сравнению с RC схемы.

Таблица I

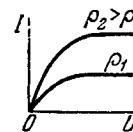
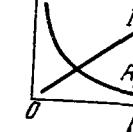
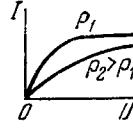
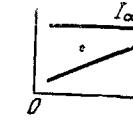
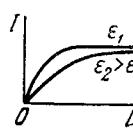
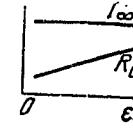
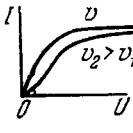
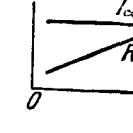
Закономерности действия α -ионизационных камер

	Изменяемая величина δ	$R_0 = f_1(\delta)$	$I_\infty = f_2(\delta)$	Вид $I = f(U)$	Вид $R_0 = f_1(\delta)$ $I_\infty = f_2(\delta)$	Область применения в измерительной технике
1	Интенсивность излучения N_0	$C_1 \sqrt{\frac{1}{N_0}}$	$K_1 N_0$			Дозиметрия ионизирующих излучений; измерение больших давлений газов, толщины листовых материалов
2	Площадь электродов S при $N_0 = \text{const}$	$C_2 \frac{1}{S}$	$K_2 S$			Измерение площадей сложной конфигурации, угловых и линейных перемещений
3	Расстояние между электродами h при $h > L$	$C_3 h$	$K_3 h$			Измерение малых угловых и линейных перемещений, ускорений и вибраций

Продолжение таблицы I

	Изменяемая величина δ	$R_0 = f_1(\delta)$	$I_\infty = f_2(\delta)$	Вид $I = f(U)$	Вид $R_0 = f_1(\delta)$ $I_\infty = f_2(\delta)$	Область применения в измерительной технике
4	Расстояние между электродами h при $h > L$	$C_4 h^{\frac{3}{2}}$	const			Измерение больших линейных перемещений
5	Плотность газа ρ при $h < L$, $p > 1 \text{ atm}$	$C_5 \rho$	$K_5 \rho$			Измерение давлений газов
6	Плотность газа ρ при $h \ll L$, $p < 1 \text{ atm}$	const	$K_6 \rho$			Измерение давления, плотности, скорости и состава газов

Продолжение таблицы I

	Изменяемая величина δ	$R_0 = f_1(\delta)$	$f_\infty = f_2(\delta)$	Вид $I = f(U)$	Вид $R_0 = f_1(\delta)$ $I_\infty = f_2(\delta)$	Область применения в измерительной технике
7	Плотность газа ρ при $h \ll L$, $p < 100$ мм рт. ст.	$C_7 \frac{1}{\rho}$	$K_7 \rho$			Измерение малых давлений газов
8	Плотность газа ρ при $h > L$ $p > 1$ ам	$C_8 \rho$	const			Измерение больших давлений газов
9	Диэлектрическая постоянная газа ϵ при $p = \text{const}$	$C_9 \sqrt{\epsilon - 1}$	const			Измерение малых концентраций примесей газов, паров и дымов в воздухе и других газах
10	Скорость течения газа v при $p = \text{const}$	$C_{10} v$	const			Измерение скорости газового потока

Относительная флуктуация равна

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\bar{n}RC}} \sqrt{1 - \frac{7}{3} \frac{h}{kERC}}. \quad (12)$$

Здесь \bar{n} — среднее число частиц, испускаемых в единицу времени радиоактивным веществом, нанесённым на электроды камеры, h — расстояние между электродами, k — средняя подвижность ионов и E — напряжённость электрического поля.

В случае, если время сортирования ионов $\frac{h}{kE}$ пренебрежимо мало по сравнению с RC , что близко подходит к условиям работы α -ионизационных приборов в участке насыщения, относительная флуктуация увеличивается, а выражение для неё принимает более простой вид:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\bar{n}RC}}. \quad (13)$$

Если постоянная времени прибора RC задана и не должна превышать определённой величины, то остаётся единственная возможность уменьшения флуктуаций за счёт увеличения эмиссии ионизующих частиц, т. е. числа \bar{n} . Напротив, если α -ионизационные приборы применяются для измерения медленно изменяющихся величин, постоянная времени RC может быть не очень малой, и тогда для уменьшения флуктуаций выгодно увеличивать ёмкость C .

Так как для подсчёта количества радиоактивного вещества, наносимого на электроды камеры, необходимо учитывать допустимую величину флуктуации, исходя из заданной точности измерения, преобразуем (13) относительно \bar{n} :

$$\bar{n} = \frac{1}{2\delta^2 RC}. \quad (14)$$

Количество радиоактивного вещества, необходимого для испускания в единицу времени \bar{n} ионизующих частиц, определяемое допустимой флуктуацией, можно найти следующим образом. Число атомов N_p , распадающихся с испусканием α - или β -частиц в 1 г радиоактивного вещества в единицу времени, равно

$$N_p = \lambda \frac{N_a}{M}, \quad (15)$$

где λ — постоянная распада радиоактивного вещества, N_a — общее число наличных атомов и M — молекулярный вес. Из (15) следует, что n ионизующих частиц будут испускать p граммов радиоактивного вещества, или

$$\bar{n} = \lambda \frac{N_a}{M} p. \quad (16)$$

Приравнивая (16) величине \bar{n} , определяемой флюктуацией (14), находим искомое количество радиоактивного вещества:

$$p = \frac{M}{\lambda N_a} \frac{1}{2\varepsilon^2 RC}. \quad (17)$$

Для известного радиоактивного вещества N_a , M и λ являются постоянными табличными величинами.

§ 7. Основные типы ионизационных камер

В настоящее время известно довольно большое количество различных типов и конструкций ионизационных камер, нашедших широкое применение в ядерной физике. Эти камеры в принципе могут быть использованы и в практике конструирования приборов для измерения неэлектрических величин. Следует заметить, что, вообще говоря, любая форма электродов камер при любом расстоянии между ними, может дать удовлетворительные результаты измерений, если подобрать соответствующие интенсивность излучения радиоактивного вещества и напряжение между электродами. Однако предпочтение следует отдать таким формам электродов, при которых обеспечивается достижение тока насыщения при меньшем напряжении.

Конструкции ионизационных камер несколько отличаются в зависимости от вида применяемого излучения (α -, β - или γ -лучи)

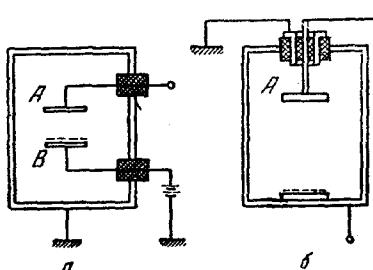


Рис. 3. Типичные конструкции плоских ионизационных камер. Пунктиром показан радиоактивный слой.

и условий проникновения излучения в камеру^{20,25}. Необходимо, однако, заметить, что ионизационные камеры, предназначенные для работы с α - и β -излучениями, во многих случаях могут быть одной и той же конструкции. Конструкции же γ -ионизационных камер существенно отличаются от α - и β -камер вследствие большой проникающей способности γ -лучей и иного механизма взаимодействия лучей с веществом.

По формам электродов все ионизационные камеры могут быть подразделены на следующие основные типы: плоская, цилиндрическая, полусферическая, сферическая и многоэлектродная камеры. Наибольшее распространение получили вследствие простоты изготовления плоские и цилиндрические камеры.

Плоские камеры. На рис. 3 показаны две типичные конструкции плоских ионизационных камер. Пунктиром условно обозначен тонкий слой радиоактивного вещества, создающего α - или β -излучение в ионизационной камере. В первой конструкции

(рис. 3, а) пластина *A* соединяется с управляющей сеткой электрометрической лампы или с нитью электрометра. Пластина *B* соединяется с полюсом батареи, и между пластинами устанавливается некоторая разность потенциалов. Металлический корпус камеры экранирует её от электростатических полей. Вторая конструкция камеры (рис. 3, б) имеет только один отдельный электрод *A*, другим электродом служит сам корпус камеры. Электрод *A* изолирован от корпуса при помощи двойного изолятора с охранным кольцом. Пластина с предварительно нанесённым радиоактивным веществом устанавливается обычно на дно корпуса камеры.

Достоинством плоской камеры является возможность получения при определённых условиях однородного электрического поля.

Цилиндрические камеры. Типичные конструкции цилиндрических ионизационных камер показаны на рис. 4. Здесь центральный электрод *A* и корпус *B* имеют цилиндрическую форму. При большой разнице в диаметрах электродов *A* и *B* напряжённость электрического поля сильно возрастает по мере приближения к электроду *A*. Ввиду этого ток насыщения при одинаковой интенсивности излучения препарата достигается в цилиндрической камере несколько позднее, чем в плоской камере. В цилиндрических камерах в зависимости от условий применения радиоактивное вещество наносится на внутреннюю поверхность цилиндра или на центральный электрод, а в некоторых случаях на дно камеры, как это показано на рис. 4, а.

Условия надёжной работы. Весьма важную роль для стабильной работы ионизационной камеры играет охранное кольцо; оно отводит от сеточного электрода*) непостоянные по величине токи утечки по поверхности и объёму изолятора. Эти утечки неизбежно происходят даже в самых лучших изоляторах через поверхностные пленки и объём изолятора при поляризации последнего. Непостоянство поверхностных утечек объясняется неустойчивым

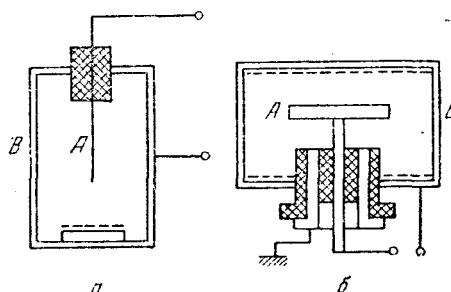


Рис. 4. Типичные конструкции цилиндрических ионизационных камер: *а* — без охранного кольца, *б* — с охранным кольцом.

*) В литературе этот электрод обычно называют собирающим или улавливающим электродом. Это название представляется нам не совсем удачным, так как в случае интегрирующих ионизационных камер оба электрода удаляют ионы из поля и, таким образом, оба они являются собирающими.

состоянием поверхностных плёнок, в которых непрерывно меняется направление путей утечки. Для значительного уменьшения утечек или почти полного их исключения охранное кольцо должно находиться под постоянным потенциалом, возможно более близким к потенциальному сеточного электрода. Обычно охранное кольцо соединяется с заземлённой точкой схемы. В качестве изоляторов сеточного электрода необходимо применять высококачественные изоляторы: янтарь, полистирол, политен, эскапон, кварц и специальные сорта пластмасс и керамики. Поверхность изолятора должна быть тщательно отполирована и обезжирена.

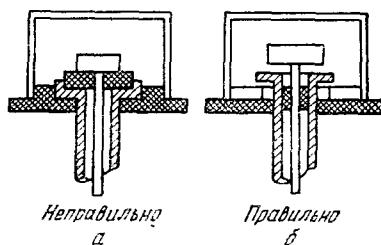


Рис. 5. Правильная и неправильная конструкции ионизационных камер.

изолятора не должна быть слишком большой во избежание возникновения ближайшего поверхности заряда. Диаметр же, например, плоского сеточного электрода должен быть немного больше диаметра изолятора; этим достигается экранировка изолятора от воздействия излучения, ухудшающего свойства изоляторов^{18, 43}. Сеточный электрод не должен примыкать своей поверхностью непосредственно к изолятору, как показано на рис. 5, а, так как в этом случае уменьшается поверхностное сопротивление изолятора.

Эти проверенные практикой меры предосторожности совершенство необходимы при измерении малых значений ионизационных токов порядка $10^{-15} - 10^{-11}$ а. Однако при конструировании ионизационных камер, предназначенных для работы с токами порядка $10^{-10} - 10^{-8}$ а при напряжениях не свыше 400 в, можно обойтись и без охранных колец, значительно усложняющих конструкции камер.

§ 8. Эффективность ионизационных камер

Под эффективностью ионизационной камеры с радиоактивным ионизатором будем понимать отношение тока насыщения или числа пар ионов, созданных радиоактивным веществом в камере данных размеров, к полному числу пар ионов, создаваемых ионизатором при использовании всего пробега ионизующих частиц. Рассмотрим наиболее трудный случай эффективности α -ионизационных камер.

Для нахождения числа пар ионов m , образуемых α -излучением внутри ионизационной камеры, ограниченной стенками, исходим из предположения, что число пар ионов, образующихся в элементарном объёме, заключённом внутри телесного угла $d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ и сферы радиуса r (рис. 6), пропорционально углу $d\omega$, некоторой функции $F(\theta)$ угла θ и некоторой функции $f(r)$ радиуса сферы r ^{*)}.

Согласно экспериментальным определениям интенсивность α -излучения пластины, покрытой радиоактивным веществом, изменяется по закону косинуса:

$$F(\theta) = K_1 \cos \theta,$$

где θ — угол между направлением полёта α -частиц и нормалью к излучающей пластине. Число пар ионов, создаваемое α -частицами

(в зависимости от их пробега L), хорошо аппроксимируется по данным М. Кюри¹⁸ функцией

$$f(r) = K_2 L^{2/3}.$$

Так как ниже подсчитывается отношение двух количеств ионов одной размерности, принимаем коэффициенты пропорциональности равными единице и полу-

чаем для числа ионов, образующихся за единицу времени в названном выше элементарном объёме, выражение

$$dm = \sin \theta \cos \theta L^{2/3} d\theta d\varphi.$$

Обозначая количество ионов, образуемых α -частицами при условии использования всего пробега, через M , находим:

$$M = L^{2/3} \int_0^{2\pi} d\varphi \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cdot \cos \theta d\theta = \pi L^{2/3}. \quad (18)$$

Для нахождения количества ионов $m = m_1 + m_2$, образующихся в единицу времени внутри цилиндрической камеры с размерами, показанными на рис. 7, обозначим через m_1 количество ионов, образующихся в единицу времени внутри конуса с вершиной в центре диска и основанием, совпадающим с верхним днищем камеры, и че-

^{*)} Приводимый ниже вывод сделан Н. И. Штейнбок совместно с Т. А. Розет.

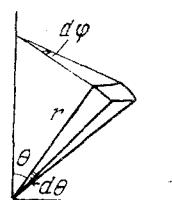


Рис. 6.

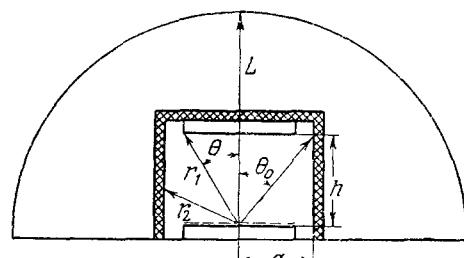


Рис. 7.

рез m_2 — количество ионов, образующихся в остальной части камеры. Так как $r_1 = \frac{h}{\cos \theta}$, причём угол θ изменяется от 0 до $\theta_0 = \operatorname{arctg} \frac{a}{h}$, а $r_2 = \frac{a}{\sin \theta}$ и $\theta_0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ (рис. 7), то

$$\begin{aligned} m_1 &= h^{2/3} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}}^{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}} \sin \theta \cos \theta \sec^{2/3} \theta d\theta = \\ &= \frac{3}{2} \pi h^{2/3} \left[1 - \frac{h^{4/3}}{(h^2 + a^2)^{1/3}} \right]; \\ m_2 &= a^{2/3} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}}^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta \cosec^{2/3} \theta d\theta = \\ &= \frac{3}{2} \pi a^{2/3} \left[1 - \frac{a^{4/3}}{(h^2 + a^2)^{1/3}} \right]; \\ m &= m_1 + m_2 = \frac{3}{2} \pi [a^{2/3} + h^{2/3} - (a^2 + h^2)^{1/3}]. \end{aligned} \quad (19)$$

Чтобы определить, какая часть общего числа образующихся ионов сосредоточивается внутри цилиндрической камеры (рис. 7), находим отношение (19) к (18):

$$q = \frac{m}{M} = \frac{3}{2} \frac{a^{2/3} + h^{2/3} - (a^2 + h^2)^{1/3}}{L^{2/3}}. \quad (20)$$

Отношение (20), названное нами эффективностью ионизационной камеры, характеризует полезно используемую часть α -излучения в ионизационной камере данных размеров.

Из (20) вытекает важный вывод, что так как q растёт не пропорционально объёму камеры, а значительно слабее, то рационально применение ионизационных камер малых размеров.

§ 9. Высокоомные сопротивления

Выбор надлежащих высокоомных сопротивлений, при помощи которых производится измерение ионизационных токов, имеет важное значение для стабильной и точной работы ионизационных приборов. В большинстве случаев, при значениях ионизационных токов порядка $10^{-12} - 10^{-9} a$, высокоомные сопротивления должны иметь значения порядка $10^{12} - 10^9 \text{ ом}$. Изготовление таких стабильных сопротивлений представляет значительные трудности.

В настоящее время известны два вида высокоомных сопротивлений: а) объёмные и б) поверхностные.

Объёмные сопротивления. Объёмные сопротивления в свою очередь делятся на жидкостные, твёрдые и ионизационные сопротивления.

Жидкостные сопротивления порядка $10^8 - 10^{10}$ ом легко изготавливаются, например, из смеси безводного алкоголя, бензола и пикриновой кислоты. В зависимости от процентного содержания алкоголя меняется величина сопротивления. Вследствие поляризации жидкостные сопротивления не могут быть сделаны более $\sim 10^{10}$ ом.

К недостаткам жидкостных сопротивлений следует отнести высокий температурный коэффициент (около 2% на 1°C) и изменение сопротивления во времени из-за постепенного испарения алкоголя и бензола.

Твёрдые объёмные сопротивления типа «дефар» изготавливаются путём пропитки пористых фарфоровых трубочек водным раствором декстрозы с последующим отжигом в восстановительной среде. Эти сопротивления отличаются большим постоянством и малым температурным коэффициентом, но, к сожалению, не могут быть сделаны выше 10^9 ом.

Из чёрной светонепроницаемой бумаги, употребляемой для обёртки фотоматериалов, можно изготовить весьма стабильные сопротивления до 10^9 ом. Температурный коэффициент этих сопротивлений в интервале $10 - 30^\circ\text{C}$ составляет 0,03% на 1°C .

Ионизационные сопротивления по сути дела также являются объёмными сопротивлениями, но только проводимость их обуславливается ионизированным объёмом газа. В качестве ионизатора применяются радиоактивные вещества, испускающие α - или мягкие β -лучи. Рабочим участком ионизационных сопротивлений является линейный участок вольтамперной характеристики, на котором сопротивление приблизительно постоянно в пределах до $0,6 \frac{I}{I_\infty}$. Ионизационные сопротивления выгодно изготавливать, применяя малые количества радиоактивного вещества, на номиналы порядка $10^9 - 10^{13}$ ом. Конструкции ионизационных сопротивлений могут быть в основном такие же, как и ионизационных камер (рис. 3 и 4), но меньших размеров. Применяя специальную технологию изготовления ионизационных сопротивлений, можно получать стабильные сопротивления различной величины и температурного коэффициента³⁰.

Поверхностные сопротивления. Поверхностные сопротивления изготавливаются нанесением тончайшей пленки проводящего материала на изоляционную подкладку. Принято считать, что высокие значения сопротивлений достигаются не в результате увеличения сопротивления самой пленки, а вследствие её разрывов.

Сопротивления порядка $10^8 - 10^{10}$ ом, изготовленные на основе сажи, туши или графита, обладают недопустимо большим температурным коэффициентом: 5 — 6% на 1°C . Кроме того, они стираются в течение длительного времени.

Поверхностные сопротивления на металлической основе изготавливаются катодным распылением платины на цилиндрики из кварца, янтаря или фарфора³². Известны также кремневые сопротивления, получаемые разложением силана на нагретых стеклянных, фарфоровых или кварцевых трубках³². Недавно описан³¹ способ изготовления высокоомных сопротивлений путём натирания металлом (безразлично каким) поверхности стеклянных или кварцевых цилиндриков с последующей герметизацией этих сопротивлений в стеклянных баллонах. Все эти сопротивления обладают значительным температурным коэффициентом (порядка 2 — 3% на 1°C) и имеют склонность изменять свою величину со временем.

При данном состоянии рассматриваемого вопроса, повидимому, лучшим решением является применение ионизационных сопротивлений.

§ 10. Измерение и усиление ионизационных токов

При использовании ионизационных камер для создания ионизационных приборов обычно приходится иметь дело с измерениями ионизационных токов порядка $10^{-12} - 10^{-8}$ а. Измерять такие токи можно в лабораторных условиях при помощи магнитоэлектрических гальванометров, струнных, динамических и ламповых электрометров^{21, 32}. В эксплуатационных условиях применение гальванометров и струнных электрометров неудобно, а в некоторых случаях и невозможно. Наиболее просто, быстро и достаточно точно ионизационные токи измеряются косвенным методом. Для этого при помощи получивших в последнее время весьма широкое распространение ламповых усилителей (ламповых вольтметров, гальванометров или электрометров) измеряется падение напряжения, вызываемое ионизационным током, на известном сопротивлении.

Собственные шумы ламп практически не сказываются на результатах измерения, так как они достигают значений порядка микровольт, в то время как величина сигнала обычно достигает значений порядка десятых вольта и более.

В качестве первых, входных электронных ламп в различных схемах усилителей ионизационных токов могут быть применены миниатюрные лампы типа «Жолудь» 6Ж1Ж (954), выпускаемые массовым производством, или специальные лампы ЭМ-1, ЭМ-2, ЭМ-3^{31, 34, 35}, выпускаемые мелкими сериями. При использовании ламп 6Ж1Ж для измерения ионизационных токов роль управляющей сетки обычно выполняет третья сетка, на которую подаётся

отрицательный по отношению к катоду потенциал. Вторая сетка рассасывает объёмный заряд, и её потенциал должен быть близок или равен потенциальному анода, который в электрометрическом режиме лежит в пределах 5—10 в. Потенциал первой, ближайшей к катоду сетки обычно поддерживается равным +1 в. Напряжение накала лампы 6Ж1Ж в электрометрическом режиме должно быть значительно меньше номинального и равно 4 в. Это значительно увеличивает срок службы ламп и уменьшает сеточный ток. Лампы 6Ж1Ж в электрометрическом режиме ($U_a = +6$ в, $U_{c_2} = +6$ в, $U_{c_1} = +1$ в, $U_h = 4$ в) имеют незначительный сеточный ток, порядка 10^{-13} — 10^{-12} а, и крутизну на линейном участке анодной характеристики 100—200 мкв/в.

Значения сеточных токов могут быть снижены путём уменьшения напряжений: анодного, первой и второй сеток и накала (U_a , U_{c_1} , U_{c_2} и U_h), однако при этом снижается и крутизна анодной характеристики.

При использовании простой одноламповой схемы для измерения ионизационных токов имеет место значительная ошибка из-за нестабильности (дрейфа) нулевой точки схемы^{21, 32, 34}. Имеются три причины нестабильности (дрейфа) нулевой точки усилителей, а именно: а) изменение анодного напряжения; б) изменение контактной разности потенциалов и в) вариации сопротивлений анодной цепи.

Изменение анодного напряжения может быть сравнительно легко скомпенсировано подбором соответствующего режима работы лампы, при котором анодный ток изменяется пропорционально изменению напряжения источника питания.

Две другие причины дрейфа вызываются изменением температуры и эмиссии катода и эквивалентны по своему действию появлению дополнительного и не постоянного смещения на управляющей сетке^{2, 34}, которое не может быть скомпенсировано в простой одноламповой схеме.

Ввиду изложенного выбор надлежащей усилительной схемы имеет очень важное значение для точной и стабильной работы ионизационных приборов.

Известные типы и разновидности схем ламповых усилителей постоянного тока могут быть подразделены на каскадные, мостиковые или балансные, компенсационные, модуляционные, комбинированные и усилители с прерывателями и преобразованием параметров цепи. Каждая из перечисленных схем имеет свои достоинства и недостатки, но в данном обзоре не представляется возможным подвергнуть их необходимому сравнению и критическому анализу. Поэтому, отсылая читателя к обширной литературе по данному вопросу^{29, 31, 32, 33, 34, 35, 75}, укажем только на совершенную необходимость применения глубокой отрицательной обратной связи для стабильной работы и уменьшения постоянной времени схемы почти всех усилителей постоянного тока.

Весьма перспективными, с нашей точки зрения, являются модуляционные усилители и усилители с механическими прерывателями и преобразованием параметров цепи^{34, 36, 37, 38, 39, 75}. Эти усилители хотя и более сложны, но оказываются незаменимыми при необходимости значительного усиления по мощности при небольшом напряжении.

§ 11. Основные схемы включения ионизационных камер, их особенности и область применения

В настоящее время применяются в основном три схемы включения ионизационных камер, служащие для измерения ионизационных токов, являющихся функцией измеряемой электрической или неэлектрической величины. Во всех схемах входное напряжение $U_{\text{вх}}$ принимается в процессе измерения постоянным, а сеточный ток входной лампы усилителя — пренебрежимо малым. Поэтому ионизационную камеру можно рассматривать как изменяющееся ионизационное сопротивление, которое в зависимости от участка вольтамперной характеристики может быть линейным и нелинейным.

На рассматриваемых ниже схемах приняты условные обозначения: закрытые ионизационные сопротивления обозначаются прямыми угольниками с двумя чёрточками — электродами в них, а открытые сопротивления обозначаются разрывом контура такого прямоугольника, указывающим на сообщение с измеряемой средой; R_0 и R_I — соответственно линейное и нелинейное сопротивления.

Первая схема. Ионизационная камера работает на линейном участке вольтамперной характеристики как омическое сопротивление, изменяющее свою величину под действием измеряемой неэлектрической величины. Сравниваемое постоянное сопротивление включается последовательно и может быть ионизационным сопротивлением R_0 или простым омическим сопротивлением R . Ионизационный ток измеряется ламповым гальванометром или усилителем того или иного типа по падению напряжения на сопротивлении R (рис. 8, а). Выходное напряжение схемы $U_{\text{вых}}$, равное по величине напряжению управляющей сетки электрометрической лампы, определяется графически или аналитически.

На рис. 8, а приведён графический способ определения $U_{\text{вых}}$. При изменении измеряемой величины изменяется вольтамперная характеристика ионизационного сопротивления (новая характеристика проведена пунктиром). Так как

$$U_{\text{вх}} = U_1 + U_2 = U'_1 + U'_2 = \text{const},$$

то

$$U_{\text{вых}} = U'_1 - U_1 = U'_2 - U_2.$$

Аналитически $U_{\text{вых}}$ определяется из условия равенства токов, протекающих через сопротивления R_0 и R . Обозначая через R_0

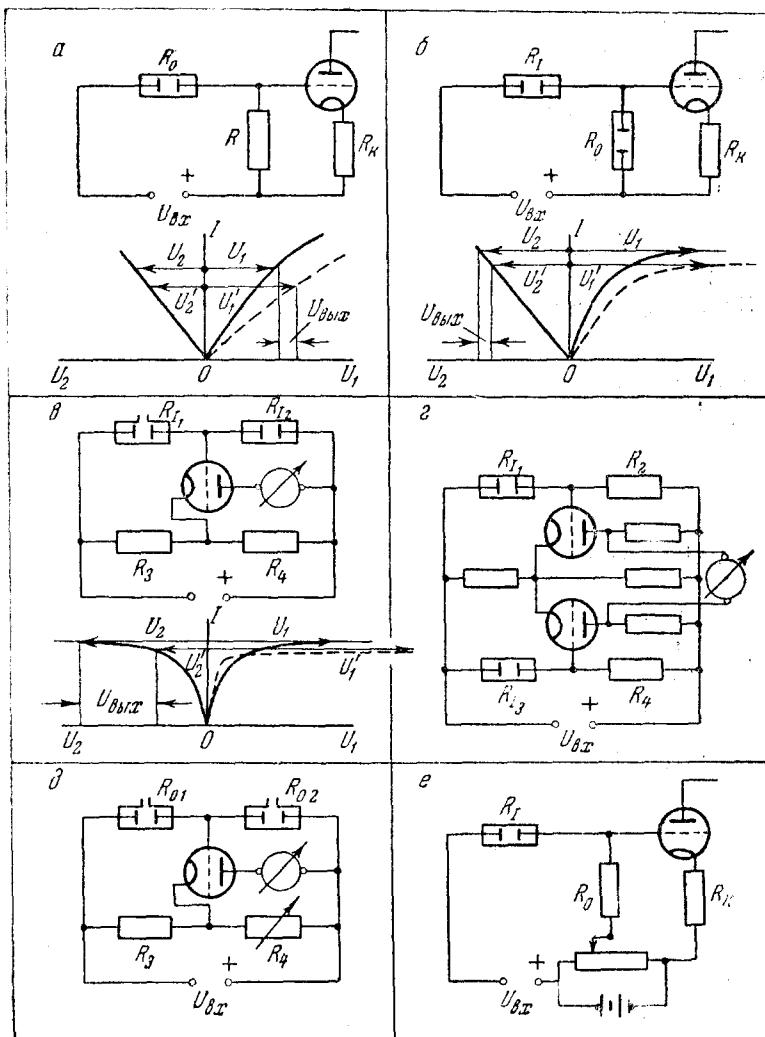


Рис. 8. Основные схемы включения ионизационных камер и графический метод нахождения $U_{\text{вых}}$. R_0 — линейное ионизационное сопротивление, R — омическое сопротивление, R_1 — нелинейное ионизационное сопротивление.

сопротивление ионизационной камеры на начальной вольтамперной характеристике и через R_0 — на изменённой характеристике, находим после простых преобразований выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и его изменение:

$$\begin{aligned}\Delta U_{\text{вых}} &= U_{\text{вых}} - U'_{\text{вых}}; \\ U_{\text{вых}} &= \frac{R}{R_0 + R}, \quad U'_{\text{вых}} = \frac{R}{R'_0 + R}; \\ \Delta U_{\text{вых}} &= \frac{R'_0 - R_0}{(R'_0 + R_0)(1 + R_0/R)} U_{\text{вх}}.\end{aligned}\quad (21)$$

Знаменатель выражения (21) изменяется мало, поэтому полагаем его, простоты ради, постоянным и равным R_a ; обратную величину $\frac{1}{R_a}$ обозначаем через g_1 . Ионизационное сопротивление R_0 равно

$$R_0 = \frac{h}{2eS} \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 N_0}}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (21) и вводя штрихи для величин выражения (7), находим:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{g_1}{2e} \left[\frac{h'}{S'} \sqrt{\frac{\alpha'}{k'_1 k'_2 N'_0}} - \frac{h}{S} \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 N_0}} \right] U_{\text{вх}}. \quad (22)$$

Это выражение значительно упрощается при рассмотрении конкретных случаев измерения. Наибольшая чувствительность схемы наблюдается при измерении h , S и плотности ρ , от которой зависят α , k_1 , k_2 и N_0 . Эта схема, в принципе, пригодна для измерения угловых и линейных перемещений, плотности и состава газов.

Как следует из (22), $\Delta U_{\text{вых}}$ прямо пропорционально $U_{\text{вх}}$, и поэтому для повышения чувствительности схемы выгодно увеличивать $U_{\text{вх}}$. Однако далеко тут идти нельзя, так как линейный участок вольтамперной характеристики простирается лишь до $0,65 \frac{I}{I_\infty}$ и поэтому общая чувствительность схемы невелика.

Вторая схема. Ионизационная камера работает на участке насыщения вольтамперной характеристики и представляет собой нелинейное сопротивление R_I , зависящее от напряжения и измеряемой неэлектрической величины. Сравниваемое сопротивление R_0 или R включено последовательно. Электрическая схема и графический метод расчёта, который остаётся прежним, показаны на рис. 8, б. Изменение выходного напряжения схемы $\Delta U_{\text{вых}}$ равно

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{R'_I - R_I}{(R'_I + R) \left(1 + \frac{R_I}{R} \right)}. \quad (23)$$

Ионизационное сопротивление R_I согласно (9) приближенно равно

$$R_I \approx \frac{R_0}{\sqrt{1 - v^2}}, \quad \text{где } v = \frac{I}{I_\infty}. \quad (24)$$

Подставляя (7) в (24) и (24) в (23), а также обозначая через R_I' сопротивление ионизационной камеры на основной вольтамперной характеристике и через R_I' — на изменённой характеристике (пунктирная кривая на рис. 8, б), находим $\Delta U_{\text{вых}}$ в развернутом виде (принимая знаменатель (23) равным постоянной величине R_b и обратную величину $\frac{1}{R_b}$ обозначая через g_2):

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{g_2}{2e} \left[\frac{h'}{S'} \sqrt{\frac{\alpha'}{k'_1 k'_2 N'_0 (1 - v_1^2)}} - \right. \\ \left. - \frac{h}{S} \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 N_0 (1 - v^2)}} \right] U_{\text{вх}}. \quad (25)$$

Рассматриваемая схема допускает приложение значительно большего входного напряжения, чем схема рис. 8, а. Однако, несмотря на это, при одинаковом относительном изменении ионизационного тока схема рис. 8, б обладает одинаковой чувствительностью со схемой 8, а. Это объясняется тем, что изменение напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ ограничивается падением напряжения на постоянном сопротивлении R .

Схема рис. 8, б широко применяется при измерении на участке насыщения интенсивности радиоактивных излучений, плотности газов и других величин.

Третья схема. Обе ионизационные камеры (сравниваемая и измерительная) работают на участке насыщения и являются нелинейными сопротивлениями. Ввиду того, что сопротивления R_{I_1} и R_{I_2} обычно близки по величине (порядка 10^{11} — 10^{14} ом) и допускают приложение больших напряжений, схемы рис. 8, а и 8, б не могут быть использованы для измерения больших сопротивлений и более целесообразно применить в данном случае мостовую схему. Эта схема и графический метод нахождения приводятся на рис. 8, в.

Из графика видно, что на участке насыщения ионизационный ток асимптотически стремится к I_∞ . Поэтому наивысшая чувствительность схемы получается при относительно малом изменении ионизационного тока — порядка процентов I_∞ . При больших изменениях тока $\Delta U_{\text{вых}}$ изменяется мало, и схема по своим свойствам приближается к схеме рис. 8, б.

При постоянных и равных значениях R_3 и R_4 имеем:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{R_{I_1} - R_{I_2}}{R_{I_1} + R_{I_2}} \frac{U_{\text{вх}}}{2}. \quad (26)$$

Знаменатель выражения (26) изменяется незначительно, так как насколько увеличивается R_{I_1} , настолько же приблизительно уменьшается R_{I_2} . Поэтому принимаем знаменатель равным постоянной величине, а обратную величину обозначаем через g_3 .

Подставив в (26) значение R_I из (24) и учитывая, далее, что через обе камеры протекает один и тот же ток I , получаем после простых преобразований выражение, сходное с (25):

$$\Delta U_{\text{вых}} = g_3 \left[\frac{R_{01}}{\sqrt{1 - v_1^2}} - \frac{R_{02}}{\sqrt{1 - v_2^2}} \right] \frac{U_{\text{вх}}}{2}. \quad (27)$$

Схема рис. 8, в не имеет ограничений в отношении величин $\Delta U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ во всяком случае до $v = 0,999$ и поэтому обладает высокой чувствительностью. Преимущества схемы используются для измерения небольших изменений плотности, состава газов, угловых и линейных перемещений.

В случае небольших изменений плотности и состава газов $k_1 \sim \frac{1}{\rho}$, $k_2 \sim \frac{1}{\rho}$, $\alpha \sim \rho$, $N_0 \sim \rho$, $h_1 = h_2 = h$, $S_1 = S_2 = S$. Тогда

$$\Delta U_{\text{вых}} = (\rho_2 - \rho_1) g_3 \frac{h}{4eS} \left[\sqrt{\frac{\alpha'}{k'_1 k'_2 N'_0 (1 - v_2^2)}} - \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 N_0 (1 - v_1^2)}} \right] U_{\text{вх}}. \quad (28)$$

В случае измерения малых угловых и линейных перемещений k_1 , k_2 , α и ρ постоянны и $\Delta U_{\text{вых}}$ зависит лишь от размеров h и S , интенсивности излучения N_0 и степени насыщения $v = \frac{I}{I_\infty}$:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{\alpha}{k_1 k_2 4e}} \left[\frac{h'}{S' \sqrt{(1 - v_2^2) N'_0}} - \frac{h}{S \sqrt{(1 - v_1^2) N_0}} \right] U_{\text{вх}}. \quad (28')$$

При незначительном изменении h интенсивность излучения N_0 может быть принята изменяющейся пропорционально h . Несмотря на то, что N_0 изменяется мало, степень насыщения v , а стало быть, и $\Delta U_{\text{вых}}$ изменяются весьма значительно, обеспечивая высокую чувствительность схемы.

Во всех рассмотренных схемах измеряемое и сравниваемое сопротивления включаются последовательно. В принципе при использовании мостовой схемы возможно и параллельное соединение ионизационных сопротивлений (рис. 8, г), однако одноламповые схемы для этой цели не могут быть применены из-за трудности изоляции

обеих узловых точек диагонали моста. Схема рис. 8, г с двумя лампами, предложенная нами, позволяет осуществить параллельное соединение ионизационных камер, что в некоторых случаях имеет преимущества перед последовательным соединением, так как при этом требуется почти вдвое меньшее входное напряжение.

В схеме рис. 8, в только одна камера измерительная, а другая— сравниваемая. Если же сравниваемую камеру также сообщить с измеряемой средой (рис. 8, д), то выходное напряжение схемы становится пропорциональным разности двух сред, например, разности плотностей, разности составов газов, разности угловых и линейных размеров и т. д.

Если тем или иным способом привести к равновесию схему моста с помощью одного из сопротивлений, например R_4 , последнее становится пропорциональным отношению двух измеряемых величин, например, отношению плотностей, отношению составов газов и т. д.

Во многих случаях для повышения точности измерения применяется компенсация выходного напряжения. Примером может служить схема рис. 8, е.

§ 12. Терминология

В связи с быстрым развитием использования радиоактивных излучений в измерительной технике и отсутствием в технической литературе подходящих терминов назрела необходимость разработки правильной научной терминологии в данной области. Этого тем более необходимо, что советская литература начинает засоряться неправильными и неудачными терминами, заимствованными из иностранной литературы, вроде: «радиоактивные полумикровесы» (см.⁷, рис. 9), «радиоактивные гальванометры» и т. п. Верно, что во всех этих приборах применяются в качестве ионизаторов радиоактивные вещества, однако это ещё не даёт основания именовать эти приборы радиоактивными; кроме того, такой термин, как, например, «радиоактивные полумикровесы» не отражает и по существу самых главных признаков прибора: ни вида применяемого излучения, ни специфического метода измерения излучения.

Нельзя согласиться и с такими терминами, как, например, «ионизационный манометр», «ионизационный газоанализатор» и т. п., которые применяются иногда к приборам, основанным на использовании радиоактивных излучений. Эта терминология также страдает односторонностью и указывает лишь на использование ионизационного метода измерений. Между тем известен ряд и других ионизационных приборов, которые также основаны на общем ионизационном принципе измерений, но имеют, например, подогревные катоды и в силу этого обладают иными свойствами и имеют иное конструктивное оформление, нежели ионизационные приборы с радиоактивным излучением.

Нам кажется, что предлагаемая ниже терминология, включающая указание на вид применяемого излучения и метод измерения, более точно отражает специфику этих новых приборов.

Учитывая, что в приборостроении могут найти применение все виды первичных и вторичных излучений радиоактивных веществ — α -, β -, γ -лучи, нейтроны и др. — и что в зависимости от вида применяемого излучения и метода измерения меняются свойства и конструкции приборов, предлагается именовать эти методы альфа-ионизационными, бета-ионизационными, гамма-ионизационными, нейтронно-ионизационными и т. д.; или, например, в случае использования сцинтилляционного метода измерений именовать эти методы альфа-сцинтилляционными, бета-сцинтилляционными, гамма-сцинтилляционными и т. п. Приборы, основанные на перечисленных методах, предлагается именовать соответственно: альфа-ионизационными, альфа-сцинтилляционными, бета-ионизационными, бета-сцинтилляционными и т. п., например: альфа-ионизационные полумикровесы, бета-ионизационный манометр, гамма-ионизационный уровнемер и т. п. или, например: бета-сцинтилляционный толщемер, гамма-сцинтилляционный уровнемер и т. д. и т. п. Легко видеть, что предлагаемая терминология может быть распространена и на другие приборы, основанные на использовании радиоактивных веществ, но на других методах измерения.

В дальнейшем в нашем обзоре мы будем пользоваться данной терминологией. Термины «радиоактивные приборы», «ионизационные приборы» и «сцинтилляционные приборы», мы, однако, считаем полезным сохранить в качестве общих сокращённых наименований всех альфа-, бета- и гамма-ионизационных, альфа-, бета- и гамма-сцинтилляционных и других приборов, вместе взятых.

II. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

§ 1. Вводные замечания

Закономерности действия α -ионизационных камер, сведённые в таблицу 1, позволяют наметить основные области применения радиоактивных излучений в измерительной технике. Следует заметить, что в литературе неоднократно появлялись описания различных приборов, основанных на использовании радиоактивных излучений, но не было обобщающих работ, которые позволили бы усмотреть в отдельных попытках применения радиоактивных изотопов большую, новую и быстро развивающуюся область измерительной техники, способную решать во многих случаях более простым путём ряд задач. Всю совокупность большого количества приборов,

которые можно создать, используя радиоактивные излучения, разделим на три основные группы приборов, основанных на изменении:

- 1) свойств газовой среды;
- 2) размеров ионизационных камер или положения источника радиоактивного излучения и
- 3) свойств радиоактивных излучений.

В приборах первой группы используется то обстоятельство, что изменение свойств газовой среды сопровождается изменениями подвижности и рекомбинации ионов или интенсивности излучения ионизатора N_0 . Они позволяют решать задачи, связанные с измерением плотности газов, их состава, скорости газового потока и т. п. При рассмотрении этой обширной группы приборов целесообразно ввести дальнейшую дифференциацию по признаку измеряемой величины, приводящую к двум подгруппам:

- а) приборы, основанные на изменении подвижности, рекомбинации и интенсивности излучения при переменном составе или плотности среды;
- б) приборы, основанные на изменении лишь интенсивности излучения при переменном составе или плотности среды.

Приборы первой подгруппы работают на линейном участке вольтамперной характеристики, приборы второй подгруппы — на участке насыщения. Существенно, что конструкции приборов, принадлежащих к обеим подгруппам, могут быть одинаковыми, но простое изменение напряжения, приложенного к ионизационной камере, изменяет свойства приборов, переводя из одной подгруппы в другую. Например, в первом случае приборы чувствительны к малым примесям посторонних газов и паров, а во втором случае — лишь к большим примесям газов и паров.

В приборах второй группы изменение измеряемой величины влечёт за собой изменение расстояния между электродами, площади перекрытия электродов ионизационных камер или положения источника радиоактивного излучения относительно ионизационных камер и счётчиков. Эта группа приборов позволяет решать задачи, связанные с измерением угловых и линейных перемещений.

В приборах третьей группы изменение измеряемой величины связано с изменениями рассеяния (отражения), интенсивности или спектрального состава излучения. Эта группа приборов предназначена для решения таких задач, как измерения толщины материалов, уровней жидкости, высоких давлений газов и т. п. Эти приборы можно также подразделить на подгруппы, основанные на:
а) поглощении и б) рассеянии излучений.

Приведимые ниже примеры практического применения радиоактивных излучений в измерительной технике, а также и наиболее интересные предложения в этой области взяты из различных работ, опубликованных за последние 10 лет, однако в некоторых случаях приводятся примеры и из более ранних работ.

§ 2. Группа приборов, основанных на изменении свойств газовой среды

а) ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕНЕНИИ ПОДВИЖНОСТИ, РЕКОМБИНАЦИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исходя из (7), ионизационный ток на линейном участке вольтамперной характеристики плоской ионизационной камеры, при условии однородности электрического поля и отсутствия объемного заряда и диффузии ионов, можно определить выражением

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} = \frac{2eS}{h} \sqrt{\frac{k_1 k_2 N_0}{a}} U_0. \quad (29)$$

При постоянных размерах h и S камеры и напряжении U_0 выражение (29) упрощается и принимает вид

$$I_0 = C_0 \sqrt{\frac{k_1 k_2 N_0}{a}}, \quad (30)$$

где C_0 — постоянная, равная $\frac{2eS}{h} U_0$.

Выражение (30) показывает, что на линейном участке вольтамперной характеристики ток зависит от подвижностей k_1 и k_2 , коэффициента рекомбинации a и интенсивности излучения N_0 .

Поскольку эти величины в свою очередь зависят от плотности и состава газовой среды, использование этого метода возможно для измерения состава газов лишь при постоянстве плотности газа, а для измерения плотности газов — лишь при постоянстве их состава. В принципе возможно еще осуществить измерения, основанные на изменении интенсивности излучения при постоянных плотности и составе газов, однако этот метод не получил распространения в технике измерения неэлектрических величин из-за слабой зависимости I_0 от N_0 .

Гораздо целесообразнее в этом случае воспользоваться не линейным участком, а участком насыщения вольтамперной характеристики, где имеется прямая пропорциональность между I_∞ и N_0 .

Рассмотрим возможности использования начального участка вольтамперной характеристики при постоянной плотности и при постоянном составе газов.

Постоянная плотность газа. При постоянной плотности газа ρ ток на линейном участке вольтамперной характеристики (30) зависит от подвижности и коэффициента рекомбинации ионов, а также от интенсивности излучения. Подвижность ионов k , находящихся в газе той же природы, наиболее удовлетворитель-

но определяется известным выражением Ланжевена (см., например, ^{44, 45}):

$$k = \frac{0,334}{\frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{(\epsilon - 1)_0 M_0}}. \quad (31)$$

При постоянной плотности газа, учитывая, что N_0 пропорционально M_0 , получаем после подстановки (31) в (30):

$$I_0 = \frac{C'_0}{\sqrt{(\epsilon - 1)_0 \alpha}}. \quad (32)$$

Коэффициенты рекомбинации ионов α различных газов весьма мало отличаются друг от друга ⁴⁶ и зависят от плотности газа, поэтому при постоянном ρ α может быть принято не зависящим от состава газа.

Из изложенного выше получаем, что на линейном участке вольтамперной характеристики ток зависит только от диэлектрической постоянной газа ϵ , т. е. от состава газа:

$$I_0 = \frac{C''_0}{\sqrt{(\epsilon - 1)_0}}. \quad (33)$$

Эта зависимость и положена в основу α -ионизационных газоанализаторов для определения весьма малых содержаний некоторых примесей газов, паров и дымов к воздуху, при которых можно считать, что с введением примеси плотность воздуха и объёмная плотность ионов остаются практически постоянными. Типичные вольтамперные характеристики для данного случая приведены в таблице 1 (№ 9).

Постоянный состав газа. При постоянном составе газовой среды ионный ток на линейном участке вольтамперной характеристики зависит от плотности среды. Входящие в (30) коэффициенты ионов k_1 и k_2 и коэффициент рекомбинации ионов α сложно зависят от плотности среды, поэтому не представляется возможным написать общее выражение для зависимости ионизационного тока от давления. В таблице 1 приведены зависимости начального сопротивления R_0 от давления воздуха p для различных участков давлений при ионизации α -лучами. Там же показаны изменения вида вольтамперных характеристик с изменением давления. Пользуясь указанными зависимостями R_0 от давления, можно на основании закона Ома написать следующие соотношения для различных участков давлений, принимая при этом, что напряжение U_0 и температура t постоянны, а расстояние между электродами h меньше пробега α -частиц L при данном давлении, т. е. $h < L$.

Зависимость I_0 от давления реализуется в измерительной технике для измерения вакуума на участке 0—100 мм рт. ст.^{56, 58, 59, 74}.

P мм рт. ст.	$I_0(p)$
0—100	$I_0 = A_1 p$
100—760	$I_0 = \text{const}$
760—2500	$I_0 = A_2 \frac{1}{p}$

Описание приборов

1. На рис. 9, иллюстрирующем схему устройства α -ионизационного газоанализатора^{47, 48, 51}, видны две цилиндрические ионизационные камеры, покрытые изнутри тонким слоем радиоактивного вещества. Через измерительную камеру 1 просасывается анализируемый газ. Камера 2 заполнена чистым воздухом и служит для компенсации изменения температуры окружающей среды. Обе камеры соединены в мостовую схему, в диагональ которой включена электрометрическая лампа. Первоначально мост находится в равновесии, и микроамперметр, включённый в анодную цепь лампы, показывает условно нуль.

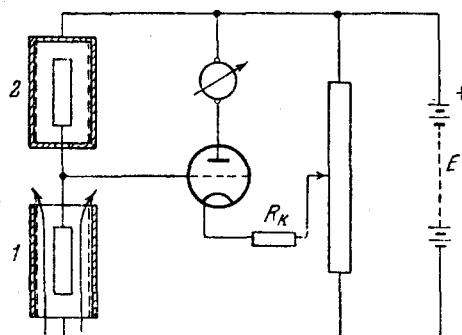


Рис. 9. Принципиальная схема α -ионизационного газоанализатора. 1 и 2 — измерительная и эталонная камеры.

При появлении в измерительной камере небольшой примеси анализируемого газа, порядка 0,01—0,001 объёмного процента, мост выходит из равновесия, и микроамперметр показывает содержание примеси.

Высокая чувствительность прибора объясняется аномально большим изменением подвижности отрицательных ионов воздуха при прибавлении небольших примесей некоторых газов и паров, таких, например, как хлор и его соединения, сернистый газ, аммиак, спирты, жирные кислоты, органические растворители и др. Такой же эффект наблюдается и при добавлении к инертным и благородным газам небольших примесей электроотрицательных газов⁴⁴.

К отличительным особенностям α -ионизационных газоанализаторов (кроме высокой чувствительности) следует отнести также:

малую инерционность показаний порядка десятых долей секунды. Недостатком прибора является отсутствие избирательности к различным примесям и необходимость поддержания постоянного давления на входе прибора.

2. Высокая чувствительность α -ионизационных газоанализаторов к посторонним примесям в воздухе позволяет применять их для предупреждения о возникновении очага пожара ещё до появления пламени, по продуктам возгорки горючих материалов, появляющимся в воздухе. Идея применения радиоактивных излучений для создания пожарного сигнализатора высказывалась неоднократно многими авторами (например, ^{47, 50}), однако практическое осуществление этой идеи наталкивалось на трудность создания электростатического реле, срабатывающего при изменении напряжения в 10—30 в. Предлагавшиеся для этой цели различные электронные реле не нашли применения из-за исключительно жёстких требований, предъявляемых к сигнализатору, а именно: сигнализатор должен быть готов к работе в течение неограниченно долгого времени, не потребляя электрической энергии. Недавно ⁴⁹ эту задачу удалось решить, применив высокочувствительный тиатрон с холодным катодом. Схема такого пожарного сигнализатора изображена на рис. 10.

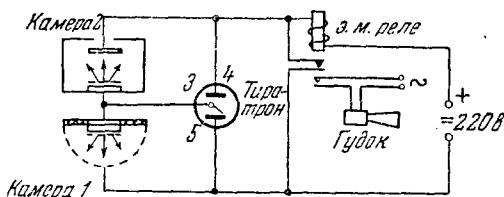


Рис. 10. Принципиальная схема α -ионизационного пожарного сигнализатора. 1 и 2 — измерительная и эталонная камеры.

Сигнализатор состоит из полусферической α -ионизационной камеры 1 с отверстиями в корпусе камеры для обмена воздуха. Последовательно с камерой 1 включена герметизированная плоская камера 2, заполненная чистым воздухом. К камерам 1 и 2 приложено постоянное напряжение в 220 в. Управляющая сетка тиатрона 3 присоединена между камерами 1 и 2, а анод 4 и катод 5 — к соответственным зажимам постоянного напряжения. При отсутствии в воздухе продуктов горения на камере 1 устанавливается разность потенциалов 80 в. При возникновении пожара ионизационное сопротивление камеры 1 увеличивается и разность потенциалов возрастает до 100—110 в, вследствие чего зажигается тиатрон, включаются электромагнитное реле и звуковой сигнал. По данным ⁴⁹ испытание пожарного сигнализатора дало удовлетворительные результаты.

3. В 1947 г. С. Я. Самойлов⁵² предложил способ измерения скорости и направления воздушного потока при помощи радиоактивных излучений. Следует, однако, заметить, что предложенная им схема далека от возможностей практического использования. Видоизменённая и улучшенная схема прибора изображена на рис. 11.

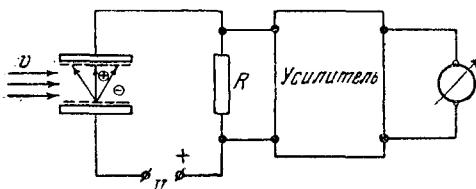


Рис. 11. Принципиальная схема α -ионизационного измерителя скорости газового потока, основанного на уносе ионов потоком.

Между электродами плоской ионизационной камеры, покрытыми тонким слоем радиоактивного вещества, приложена некоторая разность потенциалов U . Возникшие в камере ионы стремятся под действием приложенного напряжения перемещаться по направлению электрического поля. Измеряемая скорость течения газа v направлена перпендикулярно к направлению движения ионов в электрическом поле. Если скорость течения газа несколько больше скорости ионов, то часть ионов будет выноситься газовым потоком, уменьшая измеряемый прибором ионный ток. При увеличении скорости течения газа и неизменном напряжении U из поля будет выноситься всё большая и большая часть ионов. Шкала измерительного прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах скорости газового потока.

Нами получено выражение (34), связывающее ионизационный ток I_0 на линейном участке вольтамперной характеристики плоской ионизационной камеры со скоростью течения газа v , длиной камеры l , напряжённостью электрического поля E , подвижностью ионов k , коэффициентом рекомбинации ионов α , интенсивностью излучения N_0 , числом ионов в единице объёма n_0 при отсутствии E и v и расстоянием от рассматриваемого электрода x :

$$I_0 = 2en_0 \left[kE - \frac{2vKE}{\sqrt{v^2 + 4l^2\alpha N_0} \operatorname{ctn} \omega x + 2ln_0 + v} \right], \quad (34)$$

где

$$\omega = \frac{\sqrt{v^2 + 4l^2\alpha N_0}}{2kEl}.$$

Рассматривая выражение (34), в знаменатель которого входит $\operatorname{ctn} \omega x$, можно сделать заключение относительно величины аргу-

мента. При малом значении $E \ll \frac{\sqrt{v^2 + 4I^2\sigma N_0}}{2\pi l}$, если аргумент гиперболического котангенса превосходит $0,7 \div 0,8$, ток I_0 от E не зависит. Для того чтобы влияние скорости течения газа было ощутимым, необходимо выбирать аргумент лежащим в пределах $0,1 \div 0,7$.

На изложенном принципе был построен и испытан на судне во время плавания в арктических водах прибор для измерения скорости ветра (при диапазоне скорости ветра в пределах $0 \div 100 \text{ м/мин}$). В приборе предусмотрено устройство, позволяющее ионизационной камере устанавливаться по направлению ветра. По сообщению авторов ³³ прибор работал в период плавания вполне исправно и обеспечивал достаточную точность измерения.

4. α -ионизационные приборы, весьма близко напоминающие по устройству приборы, описанные выше, получили интересное применение в медицине. Описание этих приборов даётся в виде исключения, вследствие их большой важности и малой известности в кругах физиков и техников.

В начале 30-х годов А. Б. Вериго и В. А. Подерни сконструировали радиевый ионизатор, применяемый в некоторых клиниках Советского Союза для лечения ряда болезней (бронхиальная астма, озена, гипертония и др. ^{54, 55}). Лечение основано на вдыхании больным большого количества отрицательных аэроионов, вырабатываемых α -ионизатором.

Схематическое устройство радиевого аэроионизатора показано на рис. 12. Аэроионизатор состоит из металлического цилиндра диаметром $20 \div 25 \text{ см}$, длиной 30 см и коаксиального с ним металлического стержня диаметром $1 \div 3 \text{ см}$, длиной 15 см . На стержень или по образующей цилиндра наносится тонким слоем около $0,2 \text{ мг}$ сернокислого радия. Между электродами приложено постоянное напряжение порядка нескольких сот вольт, создающее радиальное электрическое поле, напряжённость которого возрастает по мере приближения к стержню. Если радиум покрыт стержень, вблизи стержня образуется область биполярной ионизации (радиусом $5 \div 7 \text{ см}$), а вблизи цилиндра — область униполярной ионизации. При принятой полярности электродов положительные ионы устремляются к стержню, а отрицательные — к цилинду. На небольшом расстоянии от прибора установлен крыльчатый венти-

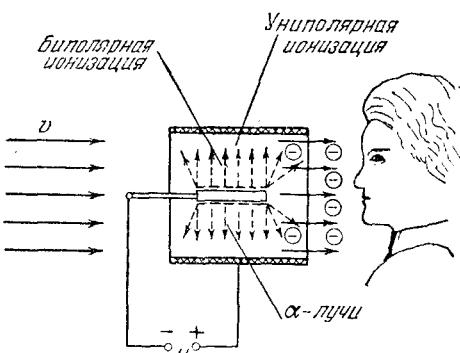


Рис. 12. Схема радиевого аэроионизатора отрицательных ионов А. Б. Вериго.

лятор, прогоняющий воздух через цилиндр со скоростью $0,3 \div 0,5$ м/сек. Вследствие того, что скорость воздушной струи несколько больше скорости отрицательных ионов в электрическом поле, значительная часть их, не достигая цилиндра, выдувается вместе со струей воздуха, попадая пациенту в концентрации $1 \div 3 \cdot 10^6$ ионов в 1 см³ воздуха. К недостаткам прибора следует отнести его большие габариты, необходимость применения больших количеств радиоактивных веществ и то, что наряду с полезными отрицательными ионами выносится и небольшая часть положительных ионов, неблагоприятно сказывающихся на здоровье человека.

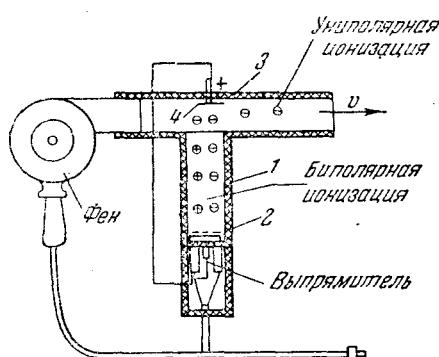


Рис. 13. Схема портативного радиевого аэронионизатора отрицательных ионов Н. И. Штейнбок.

расположен другой электрод 4. Между электродами приложено постоянное напряжение порядка 100 в, получаемое от миниатюрного селенового выпрямителя, расположенного в приборе. Стакан 1 имеет высоту, немного превышающую длину пробега α -частиц в воздухе. Электрод 4, имеющий положительную полярность, вытягивает из биполярной области отрицательные ионы. В трубку 3 вставлен вентилятор типа «фен», создающий воздушный поток, направленный перпендикулярно к направлению движения отрицательных ионов. При скорости воздушного потока, бóльшей скорости отрицательных ионов в направлении поля, все отрицательные ионы выносятся из поля, попадая пациенту. В некоторых случаях можно обойтись и без вентилятора, вдыхая воздух носом или ртом.

К достоинствам прибора следует отнести получение 100% униполярной ионизации при малых габаритах прибора и в 10 раз меньших количествах радиоактивного вещества, чем в приборе А. Б. Вериго. Вследствие простоты устройства и невысокой стоимости прибор может стать достоянием каждого больного для лечения в домашних условиях, а также для оздоровления воздуха в жилых помещениях.

Существенное преимущество перед описанным выше прибором имеет портативный аэроионизатор, разработанный нами. Принципиальная схема прибора изображена на рис. 13. Прибор состоит из пластмассового стакана 1, внутри которого расположен электрод 2, покрытый тонким слоем сернистого радия или радиоизотопом, испускающим α - или мягкие β -лучи.

В пластмассовой трубке 3

б) ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕНЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ СОСТАВЕ ИЛИ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТИ СРЕДЫ

Принцип действия этой группы приборов легко уяснить из схемы рис. 14. Между электродами плоской α -ионизационной камеры приложена некоторая разность потенциалов U , достаточная для достижения тока насыщения. Нижний электрод покрыт тонким слоем радиоактивного вещества, испускающего α -лучи. Для большей ясности на рис. 14 показан путь одиночной α -частицы, имеющей в воздухе при нормальных давлении и температуре пробег L . Расстояние между электродами равно h . При указанном соотношении $h < L$ α -частицы создают ток I , меньший, чем они могли бы создать при расстоянии между электродами L , так как на ионизацию расходуется только часть кинетической энергии α -частицы.

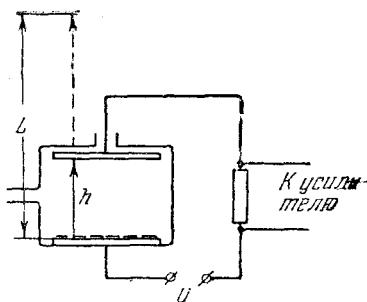


Рис. 14. Принципиальная схема α -ионизационного манометра. L — пробег α -частицы в газе, h — пробег α -частицы внутри камеры.

При изменении плотности газа за счёт изменения давления и при постоянных размерах камеры пробег α -частиц изменяется обратно пропорционально, а ток насыщения — прямо пропорционально плотности:

$$I_{\infty} = e h S N_0 = C_p. \quad (35)$$

Аналогичная картина наблюдается и при изменении состава газа или процентного содержания одного из компонент, так как плотность газа пропорциональна молекулярному весу газа, т. е. $I_{\infty} \sim M_0$.

Вышеизложенное остаётся справедливым и для других ионизующих частиц. Предложены основанные на указанном принципе манометры, плотномеры⁵⁷, вакуумметры^{56, 57}, измерители скорости газового потока с трубкой «Пито»⁵⁷, а также газоанализаторы^{47, 48, 51}, для определения содержания примесей (порядка процентов) в воздухе и других газах.

Вольтамперные характеристики при различных значениях плотности газа приводятся в таблице I (№ 5, 6, 7, 8).

Описание приборов

1. Принципиальная схема прибора для измерения плотности и давления газов изображена на рис. 15¹⁷. Прибор состоит из α -ионизационных камер 1 и 2, включённых последовательно. Из них камера 1 сообщается с измеряемой средой, а камера 2 герметизирована. Вместо камеры 2 может быть включено стабильное высокое омное сопротивление. Усилитель ионизационных токов со-

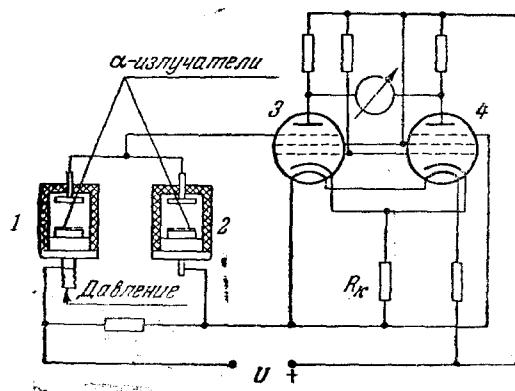


Рис. 15. Схема α -ионизационного измерителя плотности и давления газов. 1 и 2 — открытая и закрытая ионизационные камеры.

ставлен из электрометрических ламп 3 и 4. В качестве указателей, в зависимости от требуемой точности и условий применения, могут быть использованы милливольтметры, логометры, автоматические потенциометры и др.

Показания прибора, строго говоря, пропорциональны плотности газа — для измерения давления необходимо предусмотреть в схеме температурную компенсацию.

Если камеру 2 также сообщить с измеряемой средой, то можно получить показания прибора, пропорциональные разности или отношению давлений.

Существенным преимуществом α -ионизационных манометров по сравнению с манометрами, основанными на использовании анероидных коробок, является малая инерционность показаний (порядка десятых долей секунды), высокая перегрузочная способность, отсутствие последействия, естественный электрический выход, лёгкость передачи показаний на расстояние и перехода на различные пределы измерения. Применяя α -излучение, можно создать манометры и производные от них приборы с широким диапазоном шкал в пределах от 0,01 до 5000 мм рт. ст. Суммарная погрешность α -иони-

зационных манометров $\pm 1,5 \div 2\%$, но она может быть снижена при дальнейшем усовершенствовании элементов прибора.

2. α -ионизационный вакуумметр, названный «альфатроном» (рис. 16)^{58, 59, 74}, состоит из ионизационной камеры, внутри которой расположен α -излучатель, содержащий приблизительно 0,2 мг радия. Один из электродов камеры имеет цилиндрическую форму, а другой выполнен в виде четырех изогнутых стержней. Электроды изолированы фарфоровыми изоляторами. Ионизационный ток

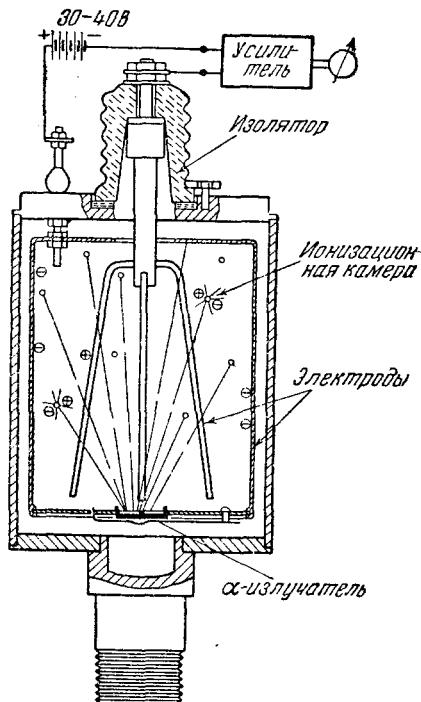


Рис. 16. Схема вакуумметра «альфатрон».

измеряется при помощи электрометрической лампы микроамперметром. Альфатрон имеет три предела измерений: $0 \div 0,1$, $0 \div 1$ и $0 \div 10$ мм рт. ст. Показания прибора зависят от рода газа, но для каждого из газов сохраняется пропорциональность отсчета давлению.

3. На зависимости интенсивности излучения от состава газов построены α -ионизационные газоанализаторы⁵¹. Устройство газоанализатора в конструктивном отношении остаётся прежним (рис. 9), с той лишь разницей, что здесь к ионизационной камере I приложено значительно большее напряжение, чем в предыдущем случае.

Благодаря этому обеспечивается переход от линейного участка вольтамперной характеристики на участок насыщения. В первом приближении можно считать, что изменение тока насыщения прямо пропорционально изменению плотности анализируемого газа. Газоанализатор отличается малой инерционностью показаний (порядка долей секунды) и может быть применён для определения содержания (порядка процентов) водорода, метана, углекислого газа, хлора и других газов в воздухе. К недостаткам прибора следует отнести необходимость поддержания давления на входе измерительной камеры с точностью $\pm 1 \text{ мм рт. ст.}$

§ 3. Группа приборов, основанных на изменении размеров ионизационных камер или положения источника радиоактивного излучения при постоянном составе и постоянной плотности среды

Изменения расстояния между электродами, площади перекрытия электродов или положения источника радиоактивного излучения относительно ионизационных камер или счётчиков существенно сказываются на величине ионизационного тока и могут быть положены в основу создания различного рода приборов, измеряющих электрические и неэлектрические величины. На использовании этого эффекта могут быть построены весьма чувствительные системы гальванометров, электрометров, реле, манометров, микровесов, следящих систем, бесконтактных регуляторов, усилителей малых напряжений постоянного тока, гравиметров, вибрографов, тензометров, акселерометров, миниметров и многих других приборов, в которых тем или иным способом осуществляется угловое или линейное перемещение чувствительного элемента. Нами, повидимому, впервые предложен^{60, 61} этот метод измерения угловых и линейных перемещений и указаны его применения для создания перечисленных выше приборов.

Разнообразные приборы, основанные на этом принципе, могут быть отнесены по своему устройству к двум основным подгруппам, у которых изменяются тем или иным способом:

- а) размеры ионизационных камер (рис. 17, а, б, в, г) или
- б) положение источника радиоактивного излучения относительно ионизационных камер или счётчиков (рис. 17, д, е).

На рис. 17, а, б, в, г показаны основные варианты устройства ионизационных камер, относящихся к первой подгруппе, которые используются или могут быть использованы в приборостроении. В этой подгруппе приборов при изменении расстояния между электродами или при изменении положения электродов друг относительно друга изменяется ионизационный ток вследствие изменения объёма или площади перекрытия электродов ионизационной камеры.

В другой подгруппе (рис. 17, *д*, *е*) при повороте стрелки, рамки или других деталей контролируемого объекта, покрытых радиоактивным веществом, изменяется ионизационный ток вследствие изменения числа или интенсивности радиоактивных частиц, попадающих в ионизационную камеру или счётчик.

Как правило, во всех приборах, основанных на описанном выше принципе, расстояние между электродами ионизационных камер меньше пробега ионизующих частиц в данной среде. Измере-

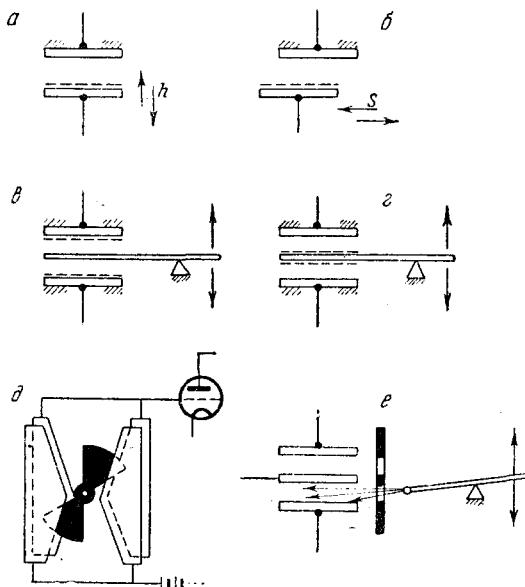


Рис. 17. Варианты способа измерения угловых и линейных перемещений при помощи радиоактивных излучений.

ние ионизационных токов производится на линейном участке или участке насыщения вольтамперных характеристик.

При использовании в качестве ионизующего агента γ -лучей увеличиваются во много раз пределы измерений, однако при этом уже нельзя руководствоваться изложенной выше методикой рассмотрения вопроса, так как ионизационный ток в этом случае зависит не только от газового промежутка, но и от переходных эффектов на стенках камер и от рассеяния γ -лучей.

В таблице I приводятся вольтамперные характеристики (№ 1, 2 и 3) при различных значениях интенсивности излучения N_0 и размеров камеры h и S . Обращает на себя внимание, что вольтамперные характеристики при различных расстояниях между электродами (таблица I, № 3 и 4) подобны характеристикам при изме-

нении плотности (таблица I, № 5 и 8). Этот результат не случаен и находится в полном согласии с теорией ионизационного метода.

Ниже описываются некоторые типичные конструкции ионизационных приборов, основанных на измерении угловых и линейных перемещений при помощи радиоактивных излучений. Сравнивая ионизационные приборы с приборами, основанными на других методах (ёмкостный, индуктивный, фотоэлектрический и др.), следует отметить, что ионизационные приборы в ряде случаев обладают более высокой чувствительностью, компактностью и простотой устройства.

а) ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР

1. Для измерения давлений газов и жидкостей предложен⁶² α -ионизационный манометр с мембраной (рис. 18, а). Здесь 1 — мембрана с α -излучателем, 2 — неподвижный электрод, изолированный от 1 материалом корпуса камеры. Между электродами 1 и 2 приложена разность потенциалов, обеспечивающая достижение тока насыщения. При изменении давления p мембрана 1 прогибается, изменения расстояние между электродами и ионизационный ток. В дальнейшем ионизационный ток усиливается и измеряется обычно. Манометры указанного типа целесообразно применять в тех случаях,

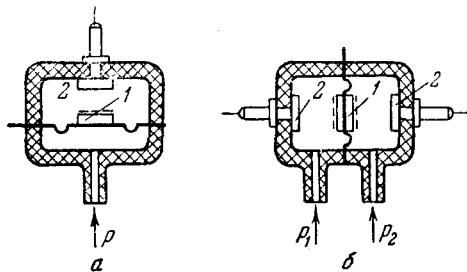


Рис. 18. α -ионизационные мембранные манометры для измерения: а — давления газов и жидкостей, б — разности давлений газов.

когда требуется запись и дистанционная передача показаний давлений.

2. Видоизменением схемы рис. 18, а является дифференциальная α -ионизационная мембранные камера (рис. 18, б) для измерения разности или отношения давлений газов⁶². Подобрав достаточно чувствительную мембрану, можно измерять разности давлений порядка долей миллиметра вёдяного столба.

3. Приведённые выше примеры иллюстрируют применение радиоактивных излучений для измерения различных неэлектрических величин. Ниже будет показано, что применение радиоактивных излучений даёт также существенный эффект и при конструировании приборов для измерения электрических величин, значительно повышая чувствительность и упрощая конструкцию высокочувствительных приборов.

На рис. 17, δ схематически показано устройство, повышающее чувствительность гальванометров^{7, 60, 61}. Вместо зеркальца, закреплённого на нити обычного зеркального гальванометра, и довольно сложного и громоздкого оптического отсчётного приспособления в данном гальванометре на нити закреплён тонкий алюминиевый или слюдяной бисквитик, покрытый с обеих сторон радиоактивным веществом. При отклонении подвижной части гальванометра от положения равновесия (среднего положения) бисквитик входит между изолированными друг от друга электродами, образующими плоскую ионизационную камеру. Происходящее при этом изменение ионизационного тока усиливается и в дальнейшем измеряется техническим электроизмерительным прибором, который может быть установлен на любом расстоянии от гальванометра. Благодаря большему усилинию электронной схемы и самой ионизационной камеры на изложенном принципе могут быть построены гальванометры и электрометры весьма высокой чувствительности. Поворот нити гальванометра на одну угловую минуту вызывает изменение тока на выходе усилителя порядка 10 мкА.

4. На рис. 19 показана другая схема α -ионизационного стрелочного гальванометра⁶⁰. Здесь слюдяная стрелка входит между

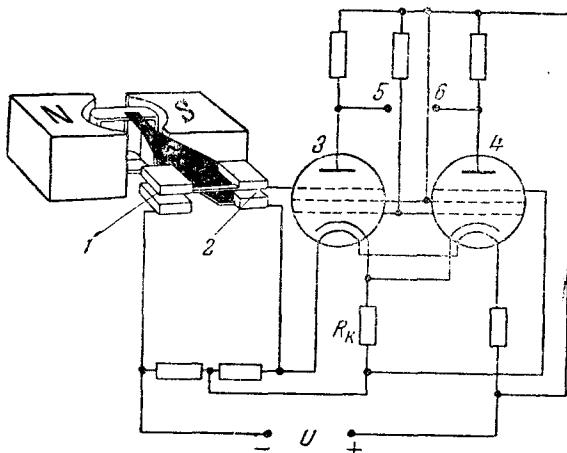


Рис. 19. α -ионизационный стрелочный гальванометр и реле. 1 и 2 — ионизационные камеры.

электродами плоских ионизационных камер 1 и 2. В этом варианте радиоактивным веществом покрыты электроды ионизационной камеры, но может быть покрыта и стрелка. Лампы 3 и 4 включены в мостовую схему. Для стабилизации работы схемы осуществляется отрицательная обратная связь посредством катодного сопротивления R_K . При изменении положения стрелки в диа-

гонали лампового моста между зажимами 5 и 6 возникает разность потенциалов, измеряемая милливольтметром. В эту же диагональ или в анодную цепь ламп могут быть включены реле, замыкающие цепь исполнительного механизма при повороте стрелки гальванометра на определённый угол.

б) ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР

1. Для регулирования и записи различных процессов может быть использована схема (рис. 20) α -ионизационной следящей системы⁶¹. В виде примера приведена схема регулирования темпера-

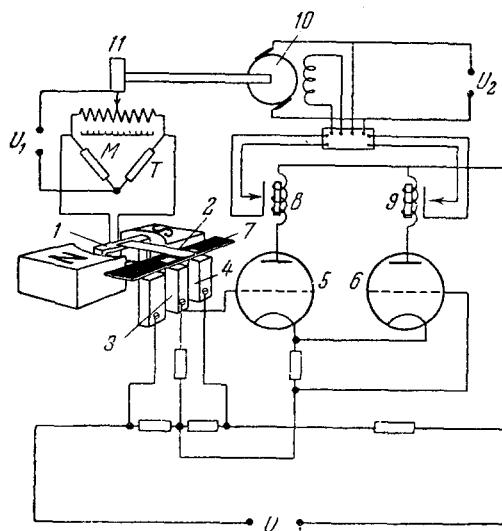


Рис. 20. Схема α -ионизационной следящей системы для записи и регулирования различных процессов.

туры при помощи термометра сопротивления T , включённого в мост M .

В отличие от схем рис. 17, д и рис. 19 в этой схеме радиоактивным веществом покрыт низ конца стрелки 2. Как видно из рисунка, стрелка перемещается над пластиной 7 с двумя отверстиями. Под пластиной 7 расположены миниатюрные ионизационные камеры 3 и 4, включённые в дифференциальную схему. В положении равновесия верхней мостовой схемы стрелка находится между отверстиями или, в другом варианте, частично перекрывает отверстия ионизационных камер. При перемещении стрелки в ту

или другую сторону в одной из ионизационных камер появляется ионизационный ток, который в дальнейшем усиливается лампами 5 или 6. Ионизационный ток нарастает пропорционально повороту стрелки в пределах её ширины. При перекрытии стрелкой одного из отверстий пластины 7 замыкаются контакты реле 8 или 9, которые приводят во вращение реверсивный двигатель 10, связанный с движком реостата 11. Двигатель вращается до тех пор, пока схема снова не придет в равновесие.

В другом варианте схемы при одновременном перекрытии стрелкой обеих ионизационных камер и при выходе из равновесия моста M изменяется потенциал сеток ламп 5 или 6 и срабатывает дифференциальное реле, включённое в диагональ ламп 5 и 6.

2. На принципе измерения малых угловых перемещений с помощью радиоактивных излучений устроены полумикровесы, позволяющие с большой точностью взвешивать навески порядка микрограммов^{7, 60}.

§ 4. Группа приборов, основанных на изменении свойств радиоактивных излучений

В отличие от α -лучей, которые полностью поглощаются тонким слоем вещества, β - и γ -лучи обладают значительно большей проникающей способностью. Они поглощаются веществом по экспонциальному закону^{18, 21}

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (36)$$

где N_0 — интенсивность излучения β - или γ -лучей, выходящего из излучателя, N — интенсивность излучения после прохождения вещества толщиной x , μ — линейный коэффициент ослабления β - или γ -лучей, зависящий от вида и энергии излучения, а также от свойств просвечиваемого вещества. Обычно μ выражается в см^{-1} вещества или в $\text{мг}^{-1} \text{см}^2$. Жёсткие β -лучи поглощаются, например, слоем свинца толщиной в $1 \div 2 \text{ мм}$, а γ -лучи — толщиной в 100 мкм и более.

Эта способность β - и γ -лучей проходить через довольно толстые слои веществ, испытывая постепенное ослабление в зависимости от толщины слоя, положена в основу конструирования измерителей толщины. Следует заметить, что наряду с поглощением β - и γ -лучей веществом всегда имеется и их рассеяние. Этот эффект также может быть использован для измерения толщины различных материалов и покрытий.

Интенсивность лучей, прошедших через вещество или рассеянных (отражённых) веществом, может быть измерена ионизационной камерой, счётчиком Гейгера-Мюллера, сцинтилляционным счётчиком с фотоэлементом или сцинтилляционным счётчиком с фотоэлек-

тронным умножителем^{40, 41}. В зависимости от интенсивности ослабленного излучения применяется та или другая схема измерения (рис. 21).

В качестве излучателей β - и γ -лучей в настоящее время применяются различные долгоживущие радиоактивные изотопы, полу-

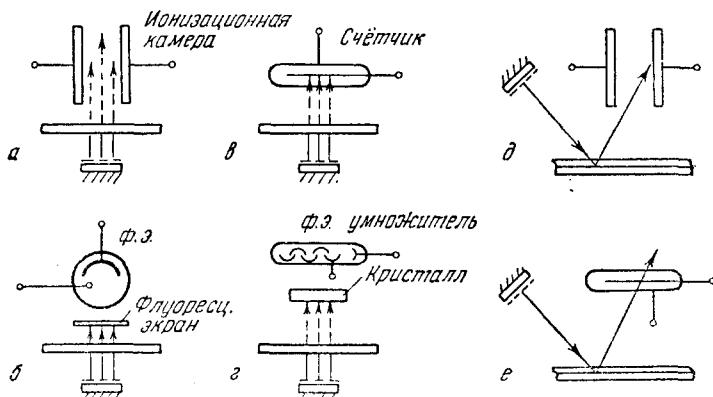


Рис. 21. Варианты способов измерения толщины листовых материалов, основанные на поглощении β - и γ -лучей (a, б, в, г) и на рассеянии β - и γ -лучей (δ , ϵ).

чаемые искусственно. В таблице II приводятся основные характеристики некоторых из этих изотопов^{15, 16, 17, 65}.

Таблица II

Атомный номер	Радиоактивное ядро	Период полу-распада в годах	Энергия β -лучей в Мэв	Энергия γ -лучей в Мэв
1	H ³	12,5	0,02	—
6	C ¹⁴	5700	0,16	—
27	Co ⁶⁰	5	0,31	1,17
38	Sr ⁹⁰	30	0,61—2,2	—
55	Cs ¹³⁷	33	0,52	—
56	Ba ¹³³	>20	—	0,35 (средн.)
57	La ¹⁴⁰	3	0,90	0,79
60	Na ¹⁵⁰	1,7	0,74	—
81	Tl ²⁰⁴	2,7	0,78	—
95	Am ²⁴³	400	0,5	—

Точность измерения толщины существенно зависит от количества применяемого радиоактивного изотопа, толщины и плотности

исследуемого материала, а также от постоянной времени электрической схемы $\tau = RC$.

В случае применения ионизационного метода измерения (рис. 21, *a*) относительная точность измерения толщины определяется соотношением^{63, 65}

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\frac{1}{e^2} \mu x}{\mu x \sqrt{2N_0 RC}}. \quad (37)$$

Если принять $\mu x = 2$, что для свинца соответствует толщине 4 см, $N_0 = 10^4$ квантов γ -лучей в секунду и $\tau = 10$ сек, то, подставляя эти значения в (37), получим $\frac{\Delta x}{x} = 0,003$. Отсюда видно, что толщина x может быть измерена с довольно высокой точностью. Относительная точность измерения тонких листов, меньших 0,5 см, при тех же значениях μ , N_0 и τ — около 1%. Для получения большей точности измерения необходимо увеличивать согласно (37) N_0 или τ .

Таблица III

Материал	Толщина в см при измерении с точностью до 1%		
	$\tau = 0,2$ сек.	$\tau = 2$ сек.	$\tau = 20$ сек.
Бумага или пластмасса	0,02—0,4	0,01—0,4	0,0025—0,4
Алюминий	0,007—0,2	0,005—0,2	0,001—0,2
Сталь 			
Бронза 	0,002—0,05	0,0015—0,05	0,0005—0,05
Медь 			
Цинк 			

В таблице III приводятся значения достигнутых в лабораторных условиях⁶⁴ пределов измерения толщины различных материалов в зависимости от постоянной времени схемы. Из этой же таблицы видно, что с повышением плотности исследуемого материала увеличивается чувствительность метода.

а) ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОГЛОЩЕНИИ β - И γ -ЛУЧЕЙ

Весьма важной проблемой в различных областях техники является точное измерение толщины металлических и неметаллических материалов (и покрытий), употребляемых в виде листов, труб, полых отливок и т. п. В некоторых случаях задача усложняется тем, что доступ к изделиям имеется только с одной сторо-

ны, как, например, в случае измерения толщины обшивки судов, стенок труб, котлов, газольдеров и т. п. В других случаях возникает необходимость измерения разностенности труб, цилиндров и других изделий.

Для измерения толщины были предложены различные приборы, основанные на электрических, магнитных, электромагнитных и других методах измерений. Оказалось,

что наивысшая точность этих приборов, по данным К. М. Поливанова и других авторов⁶³, $\pm(5 \div 10)\%$, что во многих случаях недостаточно.

1. В 1943 г. О. Н. Вавилов, Н. А. Добротин, И. М. Франк, А. И. Авдеенко и В. А. Цукерман⁶³ разработали новый метод измерения разностенности труб, основанный на различном поглощении γ -лучей материалом стенок в зависимости от их толщины. На рис. 22 изображена принципиальная схема измерителя разностенности труб. Препарат 3, излучающий γ -лучи, устанавливается

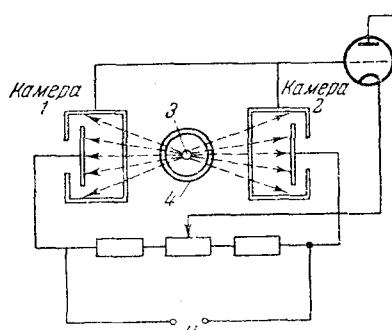
Рис. 22. Принципиальная схема γ -ионизационного способа измерения разностенности труб: 1 и 2 — ионизационные камеры; 3 — γ -излучатель; 4 — исследуемая труба.

внутри просвечиваемой трубы. Выходящее из трубы ослабленное γ -излучение измеряется ионизационными камерами 1 и 2, включёнными дифференциально. Если труба разностенная, то появляется разностный ток, измеряемый микроамперметром.

Этот метод измерений имеет ряд преимуществ перед другими методами в части возможности измерения разностенности не только прямых, но также изогнутых и фигурных труб; кроме того, оказалось, что точность измерения при этом не зависит от толщины и качества обработки поверхности труб.

2. При производстве бумаги, резины, тканей, цветных металлов, легированных сталей, фото-, кино- и других материалов возникает необходимость непрерывно бесконтактно контролировать толщину лент, плёнок и листов. Этот контроль может быть наложен с помощью радиоактивных излучений.

Первые приборы для контроля толщины лент и плёнок были построены¹³ по схемам рис. 21, а и 21, б. Легко видеть, что при указанных схемах измерения ионизационный ток пропорционален полной интенсивности β - или γ -лучей, выходящих из исследуемого материала. Поэтому, естественно, точность измерения не может быть достаточно высокой. Кроме того, при пользовании приборами, построенными по этим схемам, возникает погрешность из-за недостаточной стабильности установки.



Дифференциальная схема (рис. 23), измеряющая разность толщины исследуемого и образцового материала, свободна от этих недостатков и даёт значительно большую точность измерения^{63, 67}.

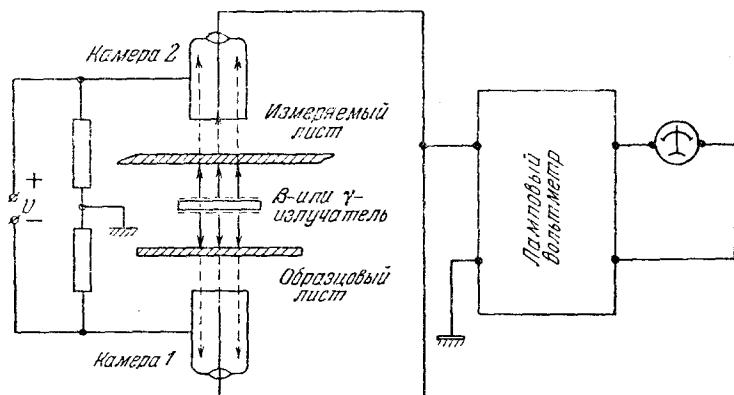


Рис. 23. Дифференциальная схема измерения толщины листовых материалов при помощи β - или γ -лучей.

К недостаткам последней схемы следует отнести наличие визуального контроля и необходимость регулирования процесса производства вручную. Схема рис. 24¹¹ представляет собой шаг вперёд в этом отношении, так как здесь осуществляется автоматическое

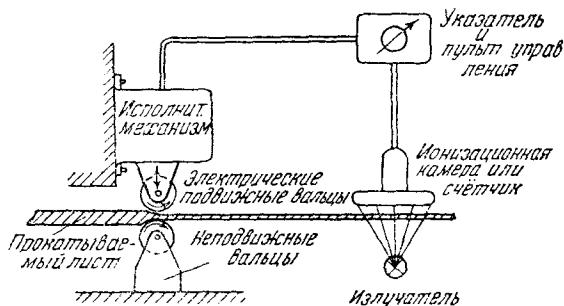


Рис. 24. Схема автоматического регулирования процесса производства листовых материалов с помощью β - или γ -лучей.

регулирование толщины листа при помощи подвижных вальцов, получающих сигнал от ионизационной камеры. Однако так как эта схема основана на прямом методе измерения интенсивности излучения, то точность и стабильность установки не могут быть достаточно высокими. Вероятно, наилучшим решением вопроса будет сочетание схем рис. 23 и рис. 24.

3. Автоматический контроль уровней жидкости, расплавленных солей и металлов или сыпучих материалов в закрытых сосудах осуществляется при помощи проникающих γ -излучений. Известны три принципиальные схемы измерения уровня жидкости 11, 12, 13, 70, 71. Схемы *а* и *б* рис. 25 применяются в случае невозможности доступа в сосуд. Принцип действия схемы ясен из рис. 25, *а*; эта схема

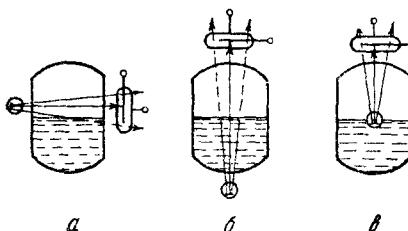


Рис. 25. Варианты γ -ионизационных измерителей уровня жидкости и расплавленных металлов: *а* и *б* — при отсутствии доступа в сосуд, *в* — при наличии доступа в сосуд.

уровней жидкости с малым удельным весом (бензин, керосин, масло) высота измеряемого столба жидкости может доходить до 1 м. В качестве детектора γ -лучей применяются счётчики или ионизационные камеры.

Схема рис. 25, *в* применяется в случае возможности расположения в сосуде поплавка с γ -излучателем. При изменении уровня жидкости изменяется интенсивность γ -лучей, достигающих детектора, в отношении, обратно пропорциональном квадрату расстояния от излучателя до детектора. Кроме того, некоторую роль здесь играет и рассеяние γ -лучей.

На том же принципе поглощения γ -лучей устроен прибор для определения уровня ртути в ртутных манометрах из стальных труб. Точность измерения уровня этим прибором $\pm 0,5 \text{ мм}$ ⁷².

4. Для измерения давлений газов порядка десятков или тысяч атмосфер нами предложены β - и γ -ионизационные манометры⁷³. Известные конструкции α -ионизационных манометров оказываются уже непригодными для измерения давлений газов выше 50 ат из-за значительной рекомбинации ионов и трудности герметизации камер с изоляторами.

В β - и γ -ионизационных манометрах эти недостатки устраняются использованием существенно иного принципа действия и тем, что приемная и измерительная части манометра разделены металлической стенкой, предохраняющей изолятор от разрушения.

Принципиальная схема таких манометров изображена на рис. 26. В манометре между стержнем, покрытым радиоактивным веществом,

применяется для указания и сигнализации о достижении максимального или минимального уровня жидкости. При необходимости непрерывного измерения уровня жидкости осуществляют следующую систему с помощью источника γ -лучей и детектора.

Схема рис. 25, *б*, основанная на поглощении столбом жидкости γ -лучей, применяется при небольшой высоте столба жидкости. В случае измерения

излучающим β - или γ -лучи, и стенками приёмника давлений имеется зазор, заполняемый измеряемым сжатым газом.

При подаче давления в металлический приёмник часть энергии излучения поглощается сжатым объёмом газа, вследствие чего интенсивность лучей, выходящих из стенок приёмника, становится меньше, приблизительно пропорционально измеряемому давлению.

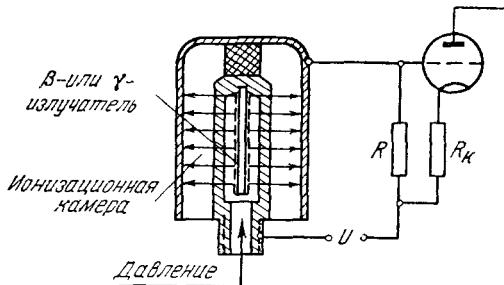


Рис. 26. Принципиальная схема β - и γ -ионизационных манометров для измерения больших давлений газов.

Вокруг приёмника давлений располагается цилиндрическая ионизационная камера или счётчик, при помощи которых измеряются давления. Пределы измерения давлений устанавливаются выбором соответствующих размеров приёмника давлений и энергий β - и γ -излучений. При выборе надлежащей постоянной времени электрической схемы эти манометры могут быть использованы для измерения не только статических, но и достаточно быстро изменяющихся давлений и плотностей газов.

5. Для измерения площадей сложной конфигурации предложен прибор^{7, 13}, основанный на поглощении α -лучей тонкими слоями веществ. В качестве ионизующего агента применяется α -излучение полония, который наносится равномерным слоем на нижний электрод плоской ионизационной камеры. Между верхним и нижним электродами устанавливается изолированная проволочная сетка. Измеряемая пластина помещается на сетку. При этом часть α -излучения, пропорциональная площади пластины, поглощается и не участвует в создании ионизационного тока. Ионизационный ток измеряется ламповым вольтметром, градуированным в единицах площади.

Б. ПРИБОРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА РАССЕЯНИИ β - И γ -ЛУЧЕЙ

В последнее время радиоактивные методы измерения толщины стали применяться также для измерения толщины листовых материалов и покрытий, доступных с одной стороны. Эти толщемеры основаны на принципе рассеяния β - и γ -лучей.

Известно, что быстрые электроны (β -лучи) при падении на металлическую поверхность частично рассеиваются электронной оболочкой атомов облучаемого вещества; при этом рассеяние тем больше, чем больше порядковый номер вещества и чем меньше энергия электронов.

Принципиальные схемы этого способа измерения толщины показаны на рис. 21, *d* и 21, *e*. При постоянном химическом составе измеряемого вещества значение ионного тока, возникающего в ионизационной камере или счётчике, зависит от толщины вещества лишь до некоторого предела, стремясь к постоянной величине. Это объясняется тем, что более глубокие слои вещества принимают меньшее участие в рассеянии электронов.

При измерении толщины покрытий на какой-нибудь подкладке необходимо, чтобы подкладка и измеряемое покрытие значительно различались по атомным весам и чтобы пробег β -лучей в измеряемом покрытии составлял не менее 30% всего пробега.

При использовании β -лучей можно измерять толщину металлических покрытий порядка сотых миллиметра⁷⁷.

На принципе рассеяния γ -квантов устроены толщемеры для измерения с точностью $\pm 5\%$ толщины стенок стальных труб и листовых материалов толщиной от нескольких миллиметров вплоть до 20 $мм$ ^{7, 69, 77, 79}.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Несмеянов, Меченные атомы, Гостехиздат, 1952.
2. М. Б. Нейман и А. Н. Несмеянов, Усп. хим. 17, 401 (1948).
3. М. Арденне, Физические основы применения радиоактивных и стабильных изотопов в качестве индикаторов, ИЛ, 1947.
4. И. Аладьев, Н. Добротин, Газета «Известия» за 1 августа 1953.
5. А. А. Жуховицкий, Применение искусственной радиоактивности в промышленности. Изд. «Правда», 1951.
6. Н. И. Штейнбок, Первая научно-техническая конференция ЛИАП. Изд. ЛИАП, апрель 1947.
7. Д. Ирвин, УФН, т. 40, 2, 301 (1950).
8. J. R. Menke, Nucleonics 4, № 5, 2 (1949).
9. G. D. Calkins, Chem. Eng. News 29, № 25, 2456 (1951).
10. T. K. Cienapp, Chem. Eng. News 30, № 50, 5240 (1952).
11. E. A. Fromhold, Technik 9, 545 (1952).
12. A. R. Schreiber, Electronics 22, № 1, 90 (1949).
13. M. Blau and J. Carlin, Electronics 18, 4 (1948).
14. J. L. Ruitmann, Research 5, № 8, 368 (1952).
15. Б. Д. Джелепов и Е. Петрович, УФН 31, 4 (1950).
16. И. П. Селинов, Атомные ядра и ядерные превращения, ч. I, Гостехиздат, 1952.
17. Г. Сиборг, И. Перлман, Таблица изотопов, ИЛ, 1951.
18. М. Кюри, Радиоактивность, Гостехиздат, 1947.
19. С. Е. Бреслер, Радиоактивные элементы, Гостехиздат, 1952.

20. В. Векслер, Л. Грошев, Б. Исаев, Ионизационные методы исследования излучений, Гостехиздат, 1949.
21. К. К. Аглиницев, Дозиметрия ионизирующих излучений, Гостехиздат, 1950.
22. Э. Поллард и В. Дэвидсон, Прикладная ядерная физика, Гостехиздат, 1947.
23. С. Корф, Счётчики электронов и ядерных частиц, ИЛ, 1947.
24. В. Б. Льюис, Методы электрического счёта альфа- и бета-частиц, Гостехиздат, 1947.
25. Б. Расси и Г. Штабуб, Ионизационные камеры и счётчики, ИЛ, 1951.
26. Н. Даc Гупта и С. Гош, Камера Вильсона и её применения в физике, ИЛ, 1947.
27. И. Я. Барит, М. И. Подгорецкий, ДАН, **60**, 563 (1948), ЖТФ 6, 730 (1949).
28. В. Бочкарев, И. Кеирим-Маркус, М. Львова, Я. Прусилии, Измерение активности источников бета- и гамма-излучений, Изд. АН СССР, 1953.
29. Дж. Маркус и В. Целюф, Технические применения электронно-ламповых схем, ИЛ, 1954.
30. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 84628.
31. А. М. Бонч-Бруевич, Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1954.
32. И. Шинтельмайстер, Электронная лампа как прибор для физических измерений, Гостехиздат, 1949.
33. А. А. Санин, Радиотехнические методы исследования излучений, Гостехиздат, 1951.
34. Б. А. Лопатин, Ламповые гальванометры постоянного тока, Госэнергоиздат, 1952.
35. Г. И. Берлеев, УФН, **49**, № 1, 93 (1953).
36. И. Я. Брэйдо, Авторск. свид. № 78854.
37. А. Р. Шульман и М. А. Шепсенволь, Сборник, посвящённый семидесятилетию акад. А. Ф. Иоффе, Изд. АН СССР, 1950.
38. K. Kandiah, D. E. Brown, Proc. Inst. El. Engrs., **99**, 70, 314 (1952).
39. M. O. Liston, C. E. Quinn, RSI 17, 194 (1946).
40. Т. М. Лившиц, УФН **3**, 365 (1953).
41. А. Вайсенберг, УФН **3**, 453 (1951).
42. Фотографическая регистрация ионизирующих излучений. Сборник статей, ИЛ, 1953.
43. F. Seitz, Phys. Today **5**, 6 (1952).
44. Н. А. Капцов, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1950.
45. В. Л. Грановский, Электрический ток в газе, ч. I, Гостехиздат, 1952.
46. Д. Кэй и Т. Лэби, Справочник физика-экспериментатора, ИЛ, 1949.
47. H. Greinacher, Bul. SEV **13**, № 8, 356 (1922).
48. P. Malsallez, Gaz Combat **1**, 79 (1935).
49. A. Soulier, RGE **59**, № 9, 367 (1950).
50. W. Jager, Bul. As. SDE **9**, 197 (1940).
51. L. Breitmann a. P. Malsallez, RGE **43**, 279 (1938); P. Malsallez a. G. Foldes, RGE **43**, 616 (1938).
52. С. Я. Самойлов, Авторск. свид. № 75354.
53. J. E. Lowelock a. E. M. Wasilewska, J. of Scient. Instr. **26**, № 11, 367 (1949).
54. А. Б. Вериго и В. А. Подерни, Проблема ионификации, т. III, 258, Воронеж, 1934.

55. Л. Л. Васильев, Теория и практика лечения ионизированным воздухом, Изд. Лен. гос. универс. им. Жданова, 1951.
56. А. С. Бучинский, Авторск. свид. № 44051.
57. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 80271.
58. J. R. Downing a. Clepp L. Mellen, RSI **17**, № 6, 218 (1946).
59. Clepp L. Mellen, Electronics, **4**, 142 (1946).
60. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 69785.
61. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 81802.
62. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 84118.
63. О. Н. Вавилов и И. М. Франк, Новые методы измерения толщины (Сборник статей), Изд. АН СССР, 1946.
64. M. G. Hammatt a. H. W. Finch, Electronic Eng. **24**, 297, 536 (1952).
65. W. R. Dixon, Atomics, **2**, № 10, 273 (1951).
66. P. O. Keefe, Mater. Meth. **36**, № 3, 87 (1952).
67. D. Taylor, Electronics Eng. **24**, 297, 533 (1952).
68. K. Fearnside, J. Brit. Inst. Radio. Engrs. **11**, № 9, 361 (1951).
69. J. R. Carlin, Ruber Age **66**, № 2, 173 (1949).
70. J. L. Putmann, Metal. Ind. **79**, № 25, 515 (1951); № 26, 543 (1951).
71. A. P. Schreiber, Nucleonics **2**, № 1, 33 (1948).
72. R. Meakin, J. Sci. Instr. **28**, 372 (1951).
73. Н. И. Штейнбок, Авторск. свид. № 84541.
74. С. Дешман, Научные основы вакуумной техники, ИЛ, 1950.
75. Л. И. Байда и А. А. Семенкович, Электронные усилители постоянного тока. Госэнергогиздат, 1953.
76. Н. Fopovits, Wien. Ber. **128**, 761 (1919).
77. М. Б. Нейман, Вестник машиностроения **4**, 34 (1954).
78. Е. П. Надеинская, Вестник машиностроения **4**, 40 (1954).
79. С. В. Румянцев, Ю. А. Григорович, Контроль качества металлов гамма-лучами, Металлургиздат, 1954.
80. Дж. Вильсон, Камера Вильсона, ИЛ, 1954.
81. Методы изучения и контроль износа в машинах при помощи радиоактивных изотопов, Изд. АН СССР, 1954.