

И. В. ПОРОЙКОВ

СПРАВОЧНИК  
ПО РЕНТГЕНОМЕТРИИ

ЛЕНИНГРАД

1936

МОСКВА

И. В. ПОРОЙКОВ

# СПРАВОЧНИК ПО РЕНТГЕНОМЕТРИИ

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ  
„СТАНДАРТГИЗ“

Главный ред. изд-ва *М. И. Гаттерман*. Ответствен. ред. *С. Э. Снарский*. Технич. ред. *Р. Н. Мосевич*.  
Ленгорлит № 16617. Тираж 1500.  
Связно в набор 10/3 1936. Подписано  
к печати 8/VII—1936 г. Форм. Бу-  
маги 60×92. Уч. авт. л. 19,23. Объем  
13<sup>2</sup>], печ. л. Знаков в печ. л. 52224  
Изд. № 19. Индекс. М—2—3—9.  
Заказ № 255:  
2-я тип. Трансжелдориздата им. Ло-  
ханкова. Ленинград, ул. Правды, 15.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоятельная необходимость в книге справочного характера по рентгенометрии обусловлена тем широким распространением, которое получили рентгеновские лучи как средство воздействия и анализа в разнообразных научно-исследовательских и прикладных областях науки и техники.

Обширный опытный материал различного рода измерений в области рентгеновских лучей, столь необходимый в практике их применения, разбросан по различным книгам и журналам общего и специального назначения, вследствие чего не всегда может быть использован без затруднений.

Преодолеть это неудобство и ставит себе целью предлагаемый читателю справочник, являющийся практическим дополнением к книге автора „Физические основы дозиметрии рентгеновских лучей“, вышедшей в 1934 г.

При подборе материала автор стремился затрагивать только те вопросы, которые в той или иной мере связаны с характеристикой и действием самого рентгеновского излучения, а также подсчетами в области рентгенометрии. Последовательность изложения, по возможности, подчинена логической связи между отдельными вопросами с целью облегчить пользование справочником.

Табличные данные специальных отделов книги сопровождаются краткими указаниями, цель которых — не только служить пояснениями к таблицам, но также ознакомить с существом вопроса и возможностями использования данных в тех или иных случаях.

Источниками для составления справочника служили фундаментальные труды по основным разделам рентгенометрии и наиболее тщательные исследования по отдельным вопросам этой области знания.

---



ОТДЕЛ I

**ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

## § 1. Единицы измерений

Численные значения коэффициентов в физических формулах зависят от выбора единиц измерений.

В абсолютной системе единиц за основные величины приняты:  
для механических явлений:

длина  $l$  [ $L$ ],  
масса  $m$  [ $M$ ],  
время  $t$  [ $T$ ],

для тепловых явлений присоединяется температура  $T$ ,  
для электрических и магнитных явлений факторы среды  $\epsilon$ ,  $\mu$ .

Все прочие единицы в этой системе являются производными.

В технической системе механических единиц за одну из основных величин принята не масса, а сила, и значит единица массы является производной.

Из возможного множества абсолютных систем в физике обычно употребляется система единиц C. G. S. (centimetre, gramme, seconde).<sup>1</sup>

В абсолютной электростатической системе единиц (C. G. S. E.) фактор среды  $\epsilon$  принимается нулевой размерности.

В абсолютной электромагнитной системе единиц (C. G. S. M.) фактор среды  $\mu$  принимается нулевой размерности.

Выбор практических единиц диктуется исключительно удобствами применения их, но в основном обычно придерживаются международных соглашений.

## § 2. Соотношения между различными единицами измерений

Углы:

$$\text{Радян} = \frac{360}{4\pi} = 57^{\circ},2958.$$

Стер-радиан — телесный угол вырезающий на сферической поверхности, описанной из вершины угла, площадь численно равную квадрату радиуса сферы.

$$\text{Угловые: градус } (^{\circ}) = 1,745 \cdot 10^{-2} \text{ рад.}$$

$$\text{минута } (') = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

$$\text{секунда } (") = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ рад.}$$

<sup>1</sup> Иногда для удобства численных выражений применяют систему M. T. S. (metre, tonne, seconde).

## Д л и н ы:

Билометр	(км) = 10 <sup>3</sup>	метров = 10 <sup>5</sup>	сантиметров
Гектометр	(гм) = 10 <sup>2</sup>	" = 10 <sup>4</sup>	"
Метр	(м) = 1	" = 10 <sup>2</sup>	"
Дециметр	(дм) = 10 <sup>-1</sup>	" = 10	"
Сантиметр	(см) = 10 <sup>-1</sup>	" = 1	"
Миллиметр	(мм) = 10 <sup>-3</sup>	" = 10 <sup>-1</sup>	"
Микрон	(μ) = 10 <sup>-6</sup>	" = 10 <sup>-4</sup>	"
Миллимикрон (mμ)	= 10 <sup>-9</sup>	" = 10 <sup>-7</sup>	"
Ангстрем (Å)	= 10 <sup>-10</sup>	" = 10 <sup>-8</sup>	"
Микромикрон (μμ)	= 10 <sup>-12</sup>	" = 10 <sup>-10</sup>	"
Английский ярд	= 3 футам	= 36 дюймам	= 0,914 м.
Английский дюйм	= 25,4 мм,		
Английская миля (London)	= 5 · 10 <sup>3</sup> футов	= 1,524 км.	
Английская миля	= 1 760 ярд	= 1,609 км.	
Сажень	= 7 футов	= 2,1336 м;	верста = 5 · 10 <sup>3</sup> саженей = 1,0668 км.
Географическая миля	= 1/15 экваториального градуса	= 7,4204 км.	
Немецкая морская миля	= 1/60 меридианного градуса	= 1,852 км.	
Немецкая земная миля	= 7,5 км.		
Японская миля (Ri)	= 36 Tschō	= 3,927 км.	
Парсек (расстояние до звезды с паралаксом в 1")	= 31 · 10 <sup>12</sup>	км.	
Световой год	= 9,5 · 10 <sup>12</sup> км	= 5,9 · 10 <sup>12</sup>	английских миль.

## П о в е р х н о с т и:

Ар (а)	= 10 <sup>2</sup> м <sup>2</sup> .
Гектар (га)	= 10 <sup>2</sup> а = 10 <sup>4</sup> м <sup>2</sup> = 10 <sup>-2</sup> км <sup>2</sup> .
Английский акр	= 0,404685 га.
Американская секция	= 640 акрам = 2,59 км <sup>2</sup> .

## О б ъ е м ы:

Литр (л)	= 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> = 1 дм <sup>3</sup> .
Гектолитр (гл)	= 10 <sup>2</sup> л = 10 <sup>-1</sup> м <sup>3</sup> = 10 <sup>2</sup> дм <sup>3</sup> .
Английский имперский галлон	= 4,5435 л.
Американский винный галлон	= 3,7852 л.
Четверть	= 2,099 гл.
Ведро	= 12,299 л.

## В е с ы, с и л ы, д а в л е н и я:

Килограмм (кг)	= 10 <sup>3</sup> г = 10 <sup>5</sup> сг = 10 <sup>6</sup> мг.
Тонна (т)	= 20 центнерам = 1 000 кг.
Английский и американский фунт	= 0,45359 кг.
Английская унция	= 1/16 фунта = 28,3495 г.
Фунт	= 1/40 пуда = 0,40953 кг
Пуд	= 16,3805 кг.

Золотник = 4,2657 г.

Карат = 0,205 г.

Грамм =  $g$  дин ( $g$  — ускорение силы тяжести).

Стен =  $10^8$  дин.

Физическая атмосфера = 760 мм Hg = 1,0332 кг/см<sup>2</sup> =  
= 1013253 бар (дин/см<sup>2</sup>).

Бар =  $10^{-4}$  пьезам (стен/м<sup>2</sup>).

### Время:

Секунда (сек.) =  $1/60$  минуты =  $1/3600$  часа.

Час =  $1/24$  средних солнечных суток.

### Температуры:

1° Цельсия =  $4/5$ ° Реомюра =  $5/9$ ° Фаренгейта.

Формулы перевода:

$$T^{\circ}(\text{Ц}) = 5/4 T^{\circ}(\text{Р}) = 5/9 (T^{\circ}(\text{Ф}) - 32).$$

$$T^{\circ}(\text{Р}) = 4/5 T^{\circ}(\text{Ц}) = 4/9 (T^{\circ}(\text{Ф}) - 32).$$

$$T^{\circ}(\text{Ф}) = 9/5 T^{\circ}(\text{Ц}) + 32 = 9/4 T^{\circ}(\text{Р}) + 32.$$

Абсолютный термодинамический нуль = 0° Кельвина = -273°20 Ц.

### Электричество и магнетизм:

Количество электричества  $Q$ :

$$\text{Кулон (C)} = 3 \cdot 10^9 \text{ C. G. S. E.} = 10^{-1} \text{ C. G. S. M.}$$

$$\text{Ампер-час (Ah)} = 10,8 \cdot 10^{12} \text{ " } = 360 \text{ " } = 3600 \text{ C}$$

Потенциал  $U$ :

$$\text{Вольт (V)} = \frac{1}{300} \text{ " } = 10^8 \text{ "}$$

Емкость  $C$  (электрическая):

$$\text{Фарада (F)} = 9 \cdot 10^{11} \text{ " } = 10^{-9} \text{ "}$$

Сила тока  $J$ :

$$\text{Ампер (A)} = 3 \cdot 10^9 \text{ " } = 10^{-1} \text{ "}$$

Сопротивление  $R$  (электрическое):

$$\text{Ом (}\Omega\text{)} = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \text{ " } = 10^9 \text{ "}$$

Проводимость  $\sigma$  (электрическая):

$$\text{Сяменс (S)} = 9 \cdot 10^{11} \text{ " } = 10^{-9} \text{ "}$$

Частота  $f$ ,  $\nu$ :

$$\text{Герц (Hz)} = 1 \text{ " } = 1 \text{ "}$$

Напряженность магнитного поля  $H$ :

$$\text{Эрстед (Oe)} = 3 \cdot 10^{10} \text{ " } = 1 \text{ "}$$

Магнитная индукция  $B$ :

$$\text{Гаусс (G)} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \quad \text{C. G. S. E.} = 1 \quad \text{C. G. S. M.}$$

Магнитное сопротивление  $R_m$ :

$$= 9 \cdot 10^{20} \quad \text{''} = 1 \quad \text{''}$$

Поток магнитной индукции  $\Phi$ :

$$\text{Максвелл (M)} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \quad \text{''} = 1 \quad \text{''}$$

Магнитодвижущая сила  $F$ :

$$\text{Гельберт (Gb)} = 12\pi \cdot 10^{10} \quad \text{''} = 4\pi \quad \text{''}$$

$$\text{Ампер-виток (Aw)} = 12\pi \cdot 10^9 \quad \text{''} = \frac{4\pi}{10} \quad \text{''}$$

Индуктивность  $L, M$ :

$$\text{Генри (H)} = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \quad \text{''} = 10^9 \quad \text{''}$$

### Энергия и работа:

$$\text{Джоуль (J)} = 10^7 \text{ эргов} = 0,24 \text{ малой калории} = 10^7 \text{ C. G. S. E.} = 10^7 \text{ C. G. S. M.}$$

$$\text{Килограммометр (кгм)} = 9,80665 \text{ джоулей} = 9,8 \cdot 10^7 \text{ эргов.}$$

$$\begin{array}{l} \text{Большая калория (Cal) (15^\circ \text{ C})} = 426,8 \text{ кгм} \\ \text{Малая " (cal) (15^\circ \text{ C})} = 4,182 \cdot 10^7 \text{ эргов} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{механический} \\ \text{эквивалент} \\ \text{тепла} \end{array} \right.$$

### Мощность:

$$\text{Ватт (W)} = \frac{\text{Джоуль}}{\text{сек.}} = 0,24 \frac{\text{мал. кал.}}{\text{сек.}} = 10^7 \text{ C.G.S.E.} = 10^7 \text{ C.G.S.M.}$$

$$\text{Лошадиная сила (PS)} = 75 \frac{\text{кгм}}{\text{сек.}} = 735,499 \text{ W.}$$

$$\text{Английская лошадиная сила (HP)} = 550 \frac{\text{фунтофутов}}{\text{сек.}} = 745,695 \text{ W.}$$

$$\text{Киловатт (kW)} = 10^3 \text{ W} = 1,36 \text{ PS} = 0,24 \frac{\text{больш. кал.}}{\text{сек.}}$$

### Специальные единицы:

$$\text{Ваттсекунда} = 0,102 \text{ кгм} = 1 \text{ джоулю.}$$

$$\text{Киловаттчас} = 1,36 \text{ лош. сил} \cdot \text{час (P. S. h)} = 864 \text{ больш. кал.}$$

$$\text{Люмен } (\lambda = 0,556 \mu) = \frac{1}{620} \text{ W.}$$

$$\text{Рентген } (r) = 0,11 \frac{\text{эрг.}}{\text{см}^2}.$$

$$\text{Электрон-вольт} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ эрга.}$$

### § 3. Разные величины

$$\text{Гравитационная постоянная } \gamma = 7,10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{сек}^2}.$$

Ускорение силы тяжести на уровне моря под широтой  $45^\circ$

$$g = 980,665 \frac{\text{см}}{\text{сек.}^2}.$$

Объем грамм-молекул идеального газа при  $0^\circ$  и 760 мм Hg:

$$V = 22,412 \text{ л.}$$

Число Авогадро (число молекул в граммоле):  $N_0 = 6,060 \cdot 10^{23}$ .

Число Лошмидта (число молекул в  $\text{см}^3$  газа при  $0^\circ$  и 760 см Hg).

$$n = 2,7 \cdot 10^{19}.$$

Универсальная газовая постоянная  $R = 8,315 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг.}}{\text{град} \cdot \text{моль}} =$

$$= 0,08204 \frac{\text{литр-атм.}}{\text{град} \cdot \text{моль}} = 1,985 \frac{\text{мал. кал.}}{\text{град} \cdot \text{моль}}.$$

Больцмановская постоянная  $k = \frac{R}{N_0} = 1,37 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг.}}{\text{град} \cdot \text{моль}}.$

Радиус молекулы водорода  $r = 10^{-8} \text{ см.}$

Масса атома водорода  $m_H = 1,662 \cdot 10^{-24}$ .

Средняя длина свободного пути молекулы водорода при  $0^\circ$  и 760 см Hg:

$$\lambda_{H_2} = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

Скорость света в пустоте:  $c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$

Скорость звука в воздухе при  $0^\circ$   $v_0 = 331,7 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$

Постоянная Фарадея (электрохимический эквивалент) 1 грамм-эквивалент вещества переносит 96 494 кулонов электричества.

Заряд электрона  $e = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ C. G. S. E.} = 1,59 \cdot 10^{-20} \text{ C. G. S. M.}$

Масса, так называемого, покоящегося электрона  $m_0 = 9 \cdot 10^{-28} \text{ г.}$

Отношение заряда к массе покоящегося электрона

$$\frac{e}{m_0} = 5,31 \cdot 10^{17} \text{ C. G. S. E.} = 1,77 \cdot 10^7 \text{ C. G. S. M.}$$

Масса протона  $m_p = 1,66 \cdot 10^{-24}$

Постоянная закона Стефана-Больцмана  $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ (C. G. S.)}$ .

Постоянная в законе Вина  $k = 0,2884 \frac{\text{см}}{\text{град}}.$

Постоянная Ридберга в предположении неподвижного ядра:

$R \approx 109\,737 \text{ см}^{-1}$  или для частоты  $R = C \cdot R \approx 3,27 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}.$

Постоянная Планка  $h = 6,547 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \times \text{сек. (квант действия)}$

# § 4. Механические величины

Таблица 1

## Объемы и моменты инерции

Тело	Ось	Объем	Момент инерции
Шар радиуса $r$	диаметр	$\frac{4}{3} \pi r^3$	$M \frac{2}{5} r^2$
Эллипсоид с осями $2a, 2b, 2c$	ось $2a$	$\frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c$	$M \frac{b^2 + c^2}{5}$
Сферич. слой, внешний рад. $r$ , внутренний $r_1$	диаметр	$\frac{4}{3} \pi (r^3 - r_1^3)$	$M \frac{2}{5} \frac{r^5 - r_1^5}{r^3 - r_1^3}$
Круговой цилиндр длины $2a$ , радиуса $r$	ось $2a$	$2\pi \cdot a \cdot r^2$	$M \frac{r^2}{2}$
То же	перпенд. к оси через центр	То же	$M \left( \frac{r^2}{4} + \frac{a^2}{3} \right)$
Полый цилиндр, длина $2a$ , внешний радиус $r$ , внут- ренний $r_1$	ось $2a$	$2\pi \cdot a (r^2 - r_1^2)$	$M \left( \frac{r^2 + r_1^2}{2} \right)$
То же	перпенд. к оси через центр	То же	$M \left( \frac{r^2 + r_1^2}{4} + \frac{a^2}{3} \right)$
Прямоугольный параллеле- пипед. размерами $2a, 2b, 2c$	ось $2a$	$8 \cdot a \cdot b \cdot c$	$M \left( \frac{b^2 + c^2}{3} \right)$
Ромбическая призма, длина $2a$ , диагонали $2b, 2c$	ось $2a$	$4 \cdot a \cdot b \cdot c$	$M \frac{b^2 + c^2}{6}$
То же	параллельно диагонали $2b$ , через центр	То же	$M \left( \frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{6} \right)$

Во всех этих случаях оси проходят через центр тяжести.  $M$  обозначает массу тела. Чтобы получить момент инерции около какой-либо оси, параллельной одной из указанных осей, но не проходящей через центр тяжести, нужно к указанному моменту прибавить величину, равную произведению массы тела на квадрат расстояния между осями.

Таблица 2

### Ускорение силы тяжести для разных широт на уровне моря

Широта в гра- дусах	$g \frac{см}{сек^2}$	Широта в гра- дусах	$g \frac{см}{сек^2}$
0	978,030	50	981,066
5	978,069	55	981,503
10	978,186	60	981,914
15	978,376	65	982,285
20	978,634	70	982,606
25	978,952	75	982,866
30	979,321	80	983,058
35	979,730	85	983,176
40	980,166	90	983,216
45	980,616	Москва	981,523
		Ленинград	981,908

## § 5. Газы

### Поправка отсчета барометра на температуру

Для приведения отсчитанной при температуре  $t$  высоты барометра  $H$  к  $0^\circ$  от отсчета нужно отнять величину  $(0,000182 - \beta) Ht$ , где  $0,000182$  коэффициент расширения ртути,  $\beta$  — коэффициент расширения шкалы.

Таблица составлена для латунной шкалы: коэффициент расширения латуни принят  $0,000019$ . Для стеклянной шкалы числа необходимо увеличить на  $0,008t$  (см. последний столбец).

Таблица 3

Температура	Отсчитанная высота барометра в мм							Для стекл. шкалы $008 t$
	720	730	740	750	760	770	780	
1°	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,01
2	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,02
3	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,02
4	0,47	0,48	0,48	0,49	0,50	0,50	0,51	0,03
5	0,59	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,04
6	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,05
7	0,82	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,06
8	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,02	0,06
9	1,06	1,07	1,09	1,10	1,11	1,13	1,14	0,07
10	1,17	1,19	1,21	1,22	1,24	1,26	1,27	0,08
11	1,29	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38	1,40	0,09
12	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	0,10
13	1,53	1,55	1,57	1,59	1,61	1,63	1,65	0,10
14	1,64	1,67	1,69	1,71	1,73	1,76	1,78	0,11
15	1,76	1,78	1,81	1,83	1,86	1,88	1,91	0,12
16	1,88	1,90	1,93	1,96	1,98	2,01	2,03	0,13
17	2,00	2,02	2,05	2,08	2,11	2,13	2,16	0,14
18	2,11	2,14	2,17	2,20	2,23	2,26	2,29	0,14
19	2,23	2,26	2,29	2,32	2,35	2,38	2,42	0,15
20	2,35	2,38	2,41	2,45	2,48	2,51	2,54	0,16
21	2,46	2,50	2,53	2,57	2,60	2,64	2,67	0,17
22	2,58	2,62	2,65	2,69	2,73	2,76	2,80	0,18
23	2,70	2,74	2,77	2,81	2,85	2,89	2,92	0,18
24	2,82	2,86	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	0,19
25	2,93	2,97	3,02	3,06	3,10	3,14	3,18	0,20
26	3,05	3,09	3,14	3,18	3,22	3,26	3,31	0,21
27	3,17	3,21	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	0,22
28	3,29	3,33	3,38	3,42	3,47	3,51	3,56	0,22
29	3,40	3,45	3,50	3,55	3,59	3,64	3,69	0,23
30	3,52	3,57	3,62	3,67	3,72	3,77	3,81	0,24



## Приведение объема газа к 0°

Табл. 4 дает значения двучлена расширения  $1 + \alpha t$  для различных  $t$   
 $(\alpha = 0,003670)$

$t$	$1 + \alpha t$	$t$	$1 + \alpha t$	Пропорциональные части	
1°	1,00367	21°	1,07707	0,1°	36,7 $10^{-5}$
2	1,00734	22	1,08074	0,2	73,4 $10^{-5}$
3	1,01101	23	1,08441	0,3	110,1 $10^{-5}$
4	1,01468	24	1,08808	0,4	146,8 $10^{-5}$
5	1,01835	25	1,09175	0,5	183,5 $10^{-5}$
6	1,02202	26	1,09542	0,6	220,2 $10^{-5}$
7	1,02569	27	1,09909	0,7	256,9 $10^{-5}$
8	1,02936	28	1,10276	0,8	293,6 $10^{-5}$
9	1,03303	29	1,10643	0,9	330,3 $10^{-5}$
10	1,03670	30	1,11010		
11	1,04037	31	1,11377		
12	1,04404	32	1,11744		
13	1,04771	33	1,12111		
14	1,05138	34	1,12478		
15	1,05505	35	1,12845		
16	1,05872	36	1,13212		
17	1,06239	37	1,13579		
18	1,06606	38	1,13946		
19	1,06973	39	1,14313		
20	1,07340	40	1,14680		

## Плотность сухого воздуха

Плотность воздуха  $d$  при температуре  $t^\circ$  и давлении  $H$  мм ртутного столба вычислена по формуле

$$d = \frac{0,001293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{H}{760}$$

## Составные части воздуха

	Кислород	Азот	Аргон	Криптон	Ксенон	Неон	Гелий	Углекислый газ
По объему	21,0	78,05	0,932	0,000005	0,0000006	0,00124	0,00041	0,030
По весу	23,2	75,5	1,29	0,000014	0,0000027	0,00085	0,00005	0,046

Температура	Д а в л е н и е						
	720 мм	730 мм	740 мм	750 мм	760 мм	770 мм	780 мм
0°	0,00 1225	0,00 1242	0,00 1259	0,00 1276	0,00 1293	0,00 1310	0,00 1327
1	1221	1238	1255	1272	1288	1305	1322
2	1216	1233	1250	1267	1284	1301	1318
3	1212	1229	1245	1262	1279	1296	1313
4	1207	1224	1241	1258	1274	1291	1308
5	1203	1220	1236	1253	1270	1287	1303
6	1199	1215	1232	1249	1265	1282	1299
7	1194	1211	1228	1244	1261	1277	1294
8	1190	1207	1223	1240	1256	1273	1289
9	1186	1202	1219	1235	1252	1268	1285
10	1182	1198	1215	1231	1247	1264	1280
11	1178	1194	1210	1227	1243	1259	1276
12	1173	1190	1206	1222	1239	1255	1271
13	1169	1186	1202	1218	1234	1251	1267
14	1165	1181	1198	1214	1230	1246	1262
15	1161	1177	1193	1210	1226	1242	1258
16	1157	1173	1189	1205	1221	1238	1254
17	1153	1169	1185	1201	1217	1233	1249
18	1149	1165	1181	1197	1213	1229	1245
19	1145	1161	1177	1193	1209	1225	1241
20	1141	1157	1173	1189	1205	1221	1236
21	1137	1153	1169	1185	1201	1216	1232
22	1134	1149	1165	1181	1197	1212	1228
23	1130	1145	1161	1177	1193	1208	1224
24	1126	1142	1157	1173	1189	1204	1220
25	1122	1138	1153	1169	1185	1200	1216
26	1118	1134	1149	1165	1181	1196	1212
27	1115	1130	1146	1161	1177	1192	1208
28	1111	1126	1142	1157	1173	1188	1204
29	1107	1123	1138	1153	1169	1184	1200
30	1104	1119	1134	1150	1165	1180	1196

## Упругость насыщенного пара воды и ртути

а) Вода: Упругость дана в мм ртутного столба через одну десятую градуса  
В пределах от  $-5,9^{\circ}$  до  $0^{\circ}$  дана упругость пара над льдом

$t$	У п р у г о с т ь п а р а в м м									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-5	3,01	2,98	2,96	2,93	2,91	2,88	2,86	2,83	2,81	2,79
-4	3,28	3,25	3,22	3,20	3,17	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04
-3	3,57	3,54	3,51	3,48	3,45	3,42	3,39	3,36	3,33	3,31
-2	3,88	3,85	3,82	3,78	3,75	3,72	3,69	3,66	3,63	3,60
-1	4,22	4,18	4,15	4,11	4,08	4,04	4,01	3,98	3,95	3,91
-0	4,58	4,54	4,51	4,47	4,43	4,40	4,36	4,32	4,29	4,25
+0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,72	4,75	4,79	4,82	4,86	4,89
1	4,93	4,96	5,00	5,03	5,07	5,11	5,14	5,18	5,22	5,26
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,73	5,77	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,02	6,06
4	6,10	6,14	6,19	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,64	6,68	6,73	6,78	6,82	6,87	6,92	6,97
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,51	7,57	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,05	8,10	8,16	8,21	8,27	8,32	8,38	8,44	8,50	8,55
9	8,61	8,67	8,73	8,79	8,85	8,91	8,97	9,03	9,09	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,52	9,59	9,65	9,72	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,04	10,11	10,18	10,25	10,31	10,38	10,45
12	10,52	10,59	10,66	10,73	10,80	10,87	10,94	11,02	11,09	11,16
13	11,23	11,31	11,38	11,46	11,53	11,61	11,68	11,76	11,84	11,91
14	11,99	12,07	12,15	12,23	12,30	12,38	12,46	12,55	12,63	12,71
15	12,79	12,87	12,96	13,04	13,12	13,21	13,29	13,38	13,46	13,55
16	13,64	13,72	13,81	13,90	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44
17	14,53	14,63	14,72	14,81	14,91	15,00	15,10	15,19	15,29	15,38
18	15,48	15,58	15,68	15,78	15,87	15,97	16,07	16,18	16,28	16,38
19	16,48	16,59	16,69	16,79	16,90	17,00	17,11	17,22	17,32	17,43
20	17,54	17,65	17,76	17,87	17,98	18,09	18,20	18,31	18,43	18,54
21	18,66	18,77	18,89	19,00	19,12	19,24	19,35	19,47	19,59	19,71
22	19,83	19,96	20,08	20,20	20,32	20,45	20,57	20,70	20,82	20,95
23	21,07	21,20	21,33	21,46	21,59	21,72	21,85	21,98	22,12	22,25
24	22,38	22,52	22,65	22,79	22,93	23,07	23,20	23,34	23,48	23,62
25	23,76	23,91	24,05	24,19	24,34	24,48	24,63	24,77	24,92	25,07
26	25,22	25,37	25,52	25,67	25,82	25,97	26,13	26,28	26,43	26,59
27	26,75	26,91	27,06	27,22	27,38	27,54	27,70	27,87	28,03	28,19
28	28,36	28,52	28,69	28,86	29,03	29,19	29,36	29,54	29,71	29,88
29	30,05	30,23	30,40	30,58	30,75	30,93	31,11	31,29	31,47	31,65
30	31,83	32,02	32,20	32,39	32,57	32,76	32,95	33,14	33,33	33,52

б) Ртуть:  $t$  — температура по Цельсию

$p$  — упругость пара в мм ртутного столба

$t$	$p$	$t$	$p$	$t$	$p$	$t$	$p$	$t$	$p$ в атмосферах
0	0,0002	70	0,0503	140	1,854	220	32,01	450	4,25
10	0,0005	80	0,0920	150	2,811	240	56,64	500	7,00
20	0,0013	90	0,1628	160	4,179	260	95,94	600	22,0
30	0,0030	100	0,2793	170	6,102	280	156,29	700	46,0
40	0,0065	110	0,4655	180	8,758	300	245,85	800	86,0
50	0,0134	120	0,7557	190	12,37	350	669,77	900	145,0
60	0,0265	130	1,197	200	17,22	400	1566,1	1000	260,0

Таблица 7

## Механические и тепловые свойства газов

	Плотность при 0 и 760 мм.ж.в.		Средний коэффициент расширения от 0° до 100°	Теплоемкость $C_p = \frac{C_p - 100^\circ}{100^\circ}$ (удельная)	$\frac{C_p}{C_v}$	Критическое состояние			Жидкое состояние			Точка отвердевания
	в воздухе	относительно воздуха				Температура	Давление в атмосферах	Точка кипения	Теплота испарения	Плотность		
Воздух.....	1,2928	1,000	0,003675	0,243	1,399	— 140,0	39,0	— 192	51	—	—	—
Водород.....	0,08985	0,06950	0,003661	3,41	1,41	— 240,0	14,0	— 252,8	123	0,07	— 259	— 259
Гелий.....	0,1787	0,1378	0,003663	1,25	1,64	— 268,0	2,3	— 267	—	0,15	— 272	— 272
Азот.....	1,2514	0,9672	0,003668	0,249	1,41	— 146,0	35,0	— 195,7	52	0,79	— 210,5	— 210,5
Кислород.....	1,4292	1,1055	0,003674	0,218	1,40	— 118,0	50,0	— 181,4	51	1,41	— 233	— 233
Хлор.....	3,1674	2,490	0,003833	0,1225	1,336	141,0	83,9	— 37,6	62	1,50	— 102	— 102
Углек. газ.....	1,9768	1,5291	0,00371	0,2025	1,30	31,2	73	— 79,1	142,4	ж.<1,7, 1,53	— 57	— 57
Аммиак.....	0,07708	0,5962	0,00386	0,520	1,262	130,0	115,0	— 33,5	321	0,63	— 75,5	— 75,5
Метан.....	0,7168	0,5545	0,00369	0,5929	1,316	— 95,5	50,0	— 164,7	—	0,42	— 184	— 184
Аргон.....	1,7809	1,3775	0,003668	0,123	1,667	— 117,4	52,9	— 186	—	1,41	— 188	— 188
Неон.....	0,9002	0,6963	—	—	1,642	— 205,0	29,0	— 220	—	1,24	— 243	— 243
Оксиг. азота.....	1,3402	1,0367	0,003719	0,2317	1,394	— 93,5	71,2	— 150,5	—	1,27	— 160,5	— 160,5
Бром.....	7,1388	5,5243	—	0,0553	1,293	302,2	—	58,75	44	2,90	— 7,3	— 7,3
Сернистый газ.....	2,9266	2,2638	0,003903	0,154	1,256	155,4	78,9	— 10	96	1,43	— 72,7	— 72,7
Сероводород.....	1,5392	1,1908	—	0,245	1,324	99,6	89,8	— 61,5	—	1,33	— 83,0	— 83,0

# § 6. Жидкости

Таблица 8

Механические и тепловые свойства жидкостей

	Плотность		Коэф. расширения	$\frac{M}{\rho \cdot V}$	Отвердевание		Кипение		Крит. состоян.	
	г/см <sup>3</sup>	°C			температура	теплота	температура	теплота	температура	давление в атмосферах
Амидовый спирт C <sub>3</sub> H <sub>15</sub> O	0,829	0	0,00095	0,554	- 117	-	+ 138	120	348	-
Анилин C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	1,038	0	0,00086	0,491	- 8	21	+ 183,9	110	426	52,4
Ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	0,792	20	0,00149	0,528	- 94,6	-	+ 56,6	125	233	52
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,879	20	0,00124	0,413	+ 5,48	30	+ 80,2	94	289	47,9
Вода H <sub>2</sub> O	1,000	4	0,000207	0,999	0	79,6	+ 100	537	374	217,5
Глицерин C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,269	0	0,000505	0,576	- 20	42,5	+ 290	-	-	-
Керосин	0,8	0	0,000955	0,51	-	-	-	-	-	-
Метилловый спирт CH <sub>3</sub> O	0,810	0	0,00119	0,600	- 97	-	+ 66	262	240	78,5
Муравьиная кислота CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,22	18	0,00103	0,522	- 8,6	53	+ 100,8	120	-	-
Нитробензол C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub>	1,21	18	0,00083	0,358	- 5	22	+ 211	79,1	-	-
Оливковое масло	0,918	16	0,000721	0,47	- 20	-	+ 300	-	-	-
Ртуть Hg	13,596	0	0,00018	0,033	- 88,87	2,82	+ 357	65	1077	456
Серный эфир C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	0,736	0	0,00166	0,564	- 118	27,4	+ 34,6	90,5	193,8	35,6
Сероуглерод CS <sub>2</sub>	1,293	0	0,00122	0,242	- 110	-	+ 46,2	83,8	273	72,0
Скипидар C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,873	16	0,00094	0,12	-	-	+ 161	74	-	-
Толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,89	18	0,00109	0,402	- 92	-	+ 110,3	86	320,6	41,6
Уксусная кислота C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,053	18	0,00107	0,487	+ 16,7	46	+ 118,5	97	321,6	57,1
Хлороформ CHCl <sub>3</sub>	1,480	18	0,00127	0,237	- 65	19,2	+ 61,2	58,5	260	54,9
Этиловый спирт C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0,807	0	0,00112	0,593	- 114	-	+ 78	206	243	63

## Поверхностное натяжение

 $\alpha$ , выраженное в динах на см

Вещество	$t^{\circ}$	$\alpha$
Вода .....	15	73
Олово .....	240	352
Ртуть .....	18	491
Свинец .....	335	473
Платина .....	2000	1819
Ацетон .....	16,8	23,3
Бензол .....	15	29
Хлороформ .....	20	28,3
Серный эфир .....	20	16,8
Этиловый спирт .....	20	22
Глицерин .....	17	65
Оливковое масло .....	20	32
Мыльная жидкость .....	—	30
Керосин .....	18	30
Толуол .....	18	28,6

# § 7. Твердые тела

Таблица 10

## Некоторые свойства твердых тел

	Плотность		Коэффициент расширения $\alpha^{\circ}-100^{\circ}$ $\alpha 10^4$	Теплоемкость $\frac{cal}{gr \cdot ^{\circ}C}$	Теплопроводн. водн. при		Точка плавления	Температура ра коэффци. $\alpha 10^3$	Удельное сопротивление при 18°
	$\frac{g}{cm^3}$	$^{\circ}C$			мал. кал.	18° см. сек.			
Алюминий .....	2,65—2,80	20	0,2220	0,219	0,48	658,7	—	2,8	+ 3,9
Бронза.....	8,78—8,89	—	0,171—0,212	0,104	0,14	—	—	18	— 0,5
Висмут .....	9,67—10,0	20	0,132	0,031	0,019	271	—	119	+ 4,2
Вольфрам.....	18,6—19,1	—	0,043	0,037	0,48	3400	—	5,5	+ 4,6
Воск.....	0,96—0,97	—	3,1—15,2	—	—	62	—	$2 \times 10^{21}$	—
Вода сплав. ....	9,70	—	—	0,04	0,3	65,5	—	50	+ 2
Дерево черное.....	1,11—1,33	—	—	—	—	—	—	—	—
Дерево лубовое.....	0,60—0,90	—	0,05—0,5	0,33	0,0005	—	—	—	—
Дерево словое .....	0,35—0,50	—	0,04—0,58	—	—	—	—	—	—
Золото.....	18,88—19,33	—	0,147	0,032	0,70	1063	—	24	+ 3,5
Железо .....	7,85—7,88	—	0,21	0,119	0,14	1530	—	10	+ 5,0
Сталь .....	7,60—7,80	—	0,106	0,12	0,11	—	—	10—70	+ 1,0—+ 5,0
Чугун .....	7,03—7,73	—	0,114	—	0,12	—	—	—	—
Инвар .....	7,9	—	0,009	—	0,011	—	—	81	+ 2
Иридий .....	22,42	17	0,090	0,032	0,14	2350	—	6,1	—
Камний .....	8,37—8,67	—	0,316	0,057	0,22	320,9	—	7,5	+ 4,2
Калий .....	0,87	20	0,83	0,17	0,23	62,3	—	6,1	+ 5,8
Кальций .....	1,54	—	—	0,17	—	810	—	4,6	+ 3,6
Кварц ⊥ оси .....	2,65	—	0,134	0,19	0,016	—	—	$3 \times 10^{22}$	—
Кварц    оси .....	2,2	—	0,08	—	0,033	—	—	$1 \times 10^{20}$	—
Кварц плавленый .....	2,2	—	0,0057	—	0,0024	—	—	$5 \times 10^{24}$	—
Кобальт .....	8,71	21	0,124	0,103	—	1480	—	9,7	+ 3,3
Константан .....	8,88	—	0,1523	0,10	0,054	—	—	49	+ 0,002
Латунь .....	8,44—8,70	—	0,188—0,193	0,088	0,26	около 900	—	7	+ 2

	Плотность		Коэффициент расширения $\alpha$ $10^4$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Теплоемкость при 18°	Теплопроводность		Точка плавления	Температура при 18°	Удельное сопротивление при 18° $\rho$ $10^8$	Температура коэфф. $\alpha$ $10^3$
	$\frac{g}{cm^3}$	$^{\circ}\text{C}$			мал. кал. 18° см. сек.	Температура плавления				
Лед .....	0,917	0	0,51	0,48	0,006	—	—	$10^{15}$	—	
Магний .....	2,0	—	0,238	—	—	—	—	—	—	
Магний .....	1,741	—	0,261	0,25	0,38	651	—	4,6	+ 4	
Манганн .....	8,5	—	0,181	0,10	0,052	—	—	44	+ 0,006	
Медь .....	8,30—8,95	20	0,167	0,094	0,92	1083	—	1,7	+ 4,1	
Натрий .....	0,9712	20	2,26	0,25	0,32	97,5	—	4,3	+ 4,4	
Нейзльбер .....	8,30—8,45	—	0,184	0,095	0,07	около 1000	—	45—51	+ 0,7	
Никелин .....	8,77	—	—	—	—	—	—	33	+ 0,22	
Никкель .....	8,60—8,90	—	0,128	0,11	0,14	1452	—	7	+ 6,2	
Нихром .....	—	—	—	—	—	—	—	100	+ 0,4	
Олово .....	6,97—7,30	—	0,230	0,055	0,157	231,9	—	14,5	+ 4,7	
Осний .....	22,5	—	0,0657	0,031	—	2700	—	60	+ 4,2	
Палладий .....	12,16	—	0,118	0,059	0,168	1519	—	11	+ 3,5	
Парафин .....	0,87—0,91	—	1,07—4,7	—	0,0006	38—56	—	$1 \times 10^{22}$	—	
Платина .....	21—37	—	0,09	0,027	0,166	1755	—	10	+ 3,9	
Пробка .....	0,22—0,26	—	—	0,69	0,001	—	—	—	—	
Свинец .....	11,34	—	—	0,03	0,083	327	—	22	+ 4,2	
Сера .....	1,92—2,07	20	0,271	0,03	1,01	106,8—119,2	—	$1,10^{23}$	—	
Серебро .....	10,42—10,60	—	1,18	0,175	0,1071	960	—	1,6	+ 4,0	
Стекло крон .....	2,4—2,8	—	0,189	0,056	0,0018	—	—	$2 \times 10^{19}$	—	
Стекло флинт .....	2,9—5,9	—	0,09	0,16	0,0014	—	—	$8 \times 10^{21}$	—	
Тантал .....	16,6	—	0,079	0,12	0,13	2900	—	15,5	+ 3,3	
Углерод алмаз .....	3,52	—	—	0,033	—	—	—	$1 \times 10^{20}$	—	
Углерод графит .....	2,25	—	0,0118	0,11	—	—	—	10	— 0,8	
Фарфор .....	2,3—2,5	—	0,079	0,16	0,037	—	—	$3 \times 10^{20}$	—	
Цинк .....	6,90—7,19	—	0,04	—	0,0025	—	—	6	+ 4,1	
Эбонит .....	1,15	—	0,298	0,093	0,2657	419,4	—	$1 \times 10^{24}$	—	
Эбонит .....	—	—	0,84	—	0,004	—	—	—	—	

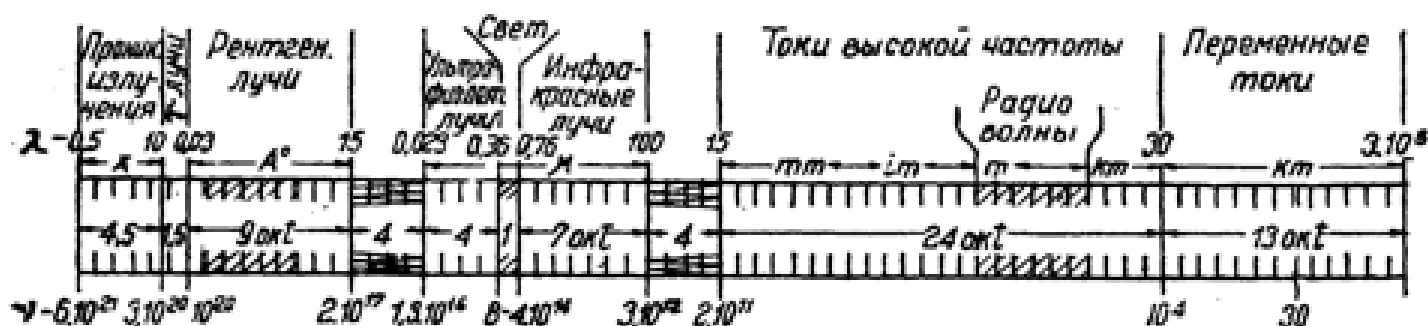


# § 8. Оптические свойства тел

Таблица 11

Длины волн наиболее ярких линий видимого атомного спектра некоторых элементов в ангстремах ( $10^{-8}$  см)

Na	5889,965 5895,932	Cu	4023 4063 5105,543	Ni	4402 4715 5086
K	4044 4047 5802 7665 7899		5153,251 5218,202 5700 5782,090 5782,159	Sn	3861 4525 4586 5799 6453
Li	3915 4132 4602 6104 6707,846	Ag	4055 4212 4669 5209,081 5465,489 5472 5623	Mg	3829 3832 3838 5167 5173 5184 5529
Ca	3877 3899 4555 4593 5635 5664 6010 6213 6723 6974	Zn	4680,138 4722,164 4810,535 4912 495 6103 6362,345	Cd	4678 4799,9088 5085,8220 6438,4696
Rb	4202 4216 5432 5724 6207 6299	Hg	3650 3655 4047 4358 5460,742 5769,598 5790,659 6124 6235 6908 7082	H	3836 3889 3970 4102 4341 4861 6563
Sr	4607			He	3888,646 4026,189 4471,477 4713,143 4921,929 5015,675 5875,618 6678,149 7065,188
Tl	3776 5351				



Показатели преломления линии *D*

Сурьмяный блеск .....	5,12	Каменная соль.....	1,544
Алмаз.....	2,419	Канадский бальзам.....	1,54
Фосфор белый.....	2,144	Крон легкий.....	1,515
Фосфор в сероуглероде ...	1,97	Сильвин.....	1,49
Флинт самый тяжелый... .	1,9	Скипидар.....	1,48
Бромист. мышьяк.....	1,78	Плавиновый шпат.....	1,434
Флинт тяжелый.....	1,75	Этиловый спирт.....	1,363
Иодистый метил.....	1,74	Вода.....	1,333
Монобромнафталин.....	1,66	Хлор.....	1,000773
Сероуглерод.....	1,63	Сернистый газ.....	1,00067
Исландский шпат:		Сероводород.....	1,00064
обыкновенный луч.....	1,659	Углекислый газ.....	1,000450
необыкновенный луч... .	1,486	Аммиак.....	1,000379
Крон тяжелый.....	1,615	Азот.....	1,000298
Флинт легкий.....	1,609	Воздух.....	1,000292
Кассиево масло.....	1,605	Кислород.....	1,000271
Кварц:		Водород.....	1,000139
необыкновенный луч... .	1,5533	Гелий.....	1,000034
обыкновенный луч.....	1,5442		
плавленый.....	1,4584		

# § 9. Таблица атомных весов химических элементов

Весы даны по системе  $\text{He}^4 = 4 \cdot \text{M}$  — масса ядра

Z	Обозначение	Элемент	Средний атомный вес	Изотопы M	Процент	Точные атомные веса ядер	Дефекты массы
0	n	Нейтрон ...	1,06	1	—	1,006	—
1	H	Водород ...	1,0074	{ 1	99,98	1,0069	—
				{ 2	0,02	2,0121	—
2	He	Гелий.....	4,0011	4	100	4,0000	—
3	Li	Литий.....	6,94	{ 6	6	6,009	0,004
				{ 7	94	7,008	0,001
4	Be	Бериллий ..	9,02	{ 8	0,1	—	—
				{ 9	99,9	—	—
5	B	Бор.....	10,82	{ 10	22	10,008	0,005
				{ 11	78	11,005	0,014
6	C	Углерод ...	11,9971	{ 12	99,9	11,9971	0,0029
				{ 13	0,1	12,997	0,009
7	N	Азот ... ..	14,0003	{ 14	99,9	14,0000	0,013
				{ 15	0,1	—	—
8	O	Кислород ..	15,995	{ 16	99,8	15,9914	0,0086
				{ 17	0,03	—	—
9	F	Фтор.....	18,99	{ 18	0,16	(17,981)	(0,0031)
				{ 19	100	18,990	0,029
10	Ne	Неон.....	20,17	{ 20	—	19,9892	—
				{ 21	—	—	0,0108
				{ 22	—	—	—
11	Na	Натрий ....	22,987	23	100	—	—
12	Mg	Магний ....	24,20	{ 24	—	—	—
				{ 25	—	—	—
				{ 26	—	—	—
13	Al	Алюминий	26,96	27	100	—	—
14	Si	Кремний ...	28,06	{ 28	—	—	—
				{ 29	—	—	—
				{ 30	—	—	—
15	P	Фосфор ....	30,97	31	100	30,968	0,055
16	S	Сера.....	32,047	{ 32	—	—	—
				{ 33	—	—	—
				{ 34	—	—	—
17	Cl	Хлор.....	35,437	{ 35	59	34,964	—
				{ 37	41	36,960	0,055
				{ 39	1	—	0,066
18	Ar	Аргон.....	39,92	{ 36	0,7	35,957	0,043
				{ 40	99,3	39,049	0,075
19	K	Калий.....	39,083	{ 39	94,8	—	—
				{ 41	5,2	—	—
20	Ca	Кальций ...	40,07	{ 40	—	—	—
21	Sc	Скандий ...	45,13	{ 44	—	—	—
				{ 45	100	—	—
22	Ti	Титан.....	47,87	{ 48	—	—	—
				{ (50)	—	—	—

Z	Обозначение	Элемент	Средний атомный вес	Изотопы M	Процент	Точные атомные веса ядер	Дефекты массы
23	V	Ванадий ...	50,92	51	100	—	—
24	Cr	Хром .....	52,01	50	4,9	—	—
				52	81,6	51,920	0,10
				53	10,4	—	—
				54	3,1	—	—
25	Mn	Марганец ..	54,92	55	100	—	—
26	Fe	Железо ....	55,81	54	—	—	—
27	Co	Кобальт....	58,92	56	—	—	—
				59	100	—	—
28	Ni	Никкель ...	58,66	58	—	57,911	0,11
29	Cu	Медь.....	63,52	60	—	—	—
				63	—	—	—
				65	—	—	—
				64	48,0	—	—
				65	2,5	—	—
				66	25,9	—	—
30	Zn	Цинк.....	65,35	67	5,3	63,903	0,117
				68	17,1	—	—
				69	0,85	—	—
				70	0,38	—	—
				71	—	—	—
31	Ga	Галлий ....	69,69	69	—	—	—
				71	—	—	—
				70	—	—	—
				71	—	—	—
				72	—	—	—
				73	—	—	—
32	Ge	Германий ..	72,57	74	—	—	—
				75	—	—	—
				76	—	—	—
				77	—	—	—
				78	—	—	—
33	As	Мышьяк ...	74,9	75	—	74,894	0,17
34	Se	Селен.....	79,2	74	—	—	—
				76	—	—	—
				77	—	—	—
				78	—	—	—
				80	—	—	—
35	Br	Бром .....	79,871	82	—	—	—
				79	50,65	78,886	0,18
				81	49,35	80,882	0,20
				78	0,4	77,884	0,15
				80	2,5	79,883	0,165
36	Kr	Криптон ...	82,9	82	11,8	81,883	0,18
				83	11,8	82,882	0,184
				84	56,8	83,883	0,19
				86	16,7	85,883	0,20
				85	—	—	—
37	Rb	Рубидий ...	85,38	87	—	—	—
38	Sr	Стронций ..	87,58	86	—	—	—
39	Y	Иттрий ....	88,88	88	—	—	—
				89	—	—	—

Z	Обозначение	Элемент	Средний атомный вес	Изотопы M	Процент	Точные атомные веса ядер	Дефекты массы
40	Zr	Циркон . . . .	91,1	{ 90 92 94 96	— — — —	— — — —	— — — —
41	Nb	Ниобий . . . .	93,2	—	—	—	—
42	Mo	Молибден . .	95,9	{ 92 94 95 96 97 98 100	— 14,2 10,2 15,5 17,8 9,6 23,0 9,8	— — — — — 97,892 99,891	— — — — — 0,19 0,20
43	Ma	Мазурий . . .	—	—	—	—	—
44	Ru	Рутений . . .	101,59	—	—	—	—
45	Rh	Родий . . . . .	102,8	—	—	—	—
46	Pd	Палладий . .	106,6	—	—	—	—
47	Ag	Серебро . . . .	107,821	{ 107 109	— —	— —	— —
48	Cd	Кадмий . . . .	112,34	{ 110 111 112 113 114 116	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —
49	In	Индий . . . . .	114,7	{ 115 112 114 115 116 117 118 119 120 121 122 124	— 1,07 0,74 0,44 14,19 9,81 21,48 11,02 27,04 2,96 5,03 6,19	— 111,858 113,856 114,854 115,852 116,853 117,850 118,849 119,847 120,846 121,845 123,842	— 0,21 0,23 0,24 0,24 0,25 0,26 0,26 0,27 0,28 0,29 0,30
50	Sn	Олово . . . . .	118,63	{ 121 123 126 128 130	— — — — —	— — — — —	— — — — —
51	Sb	Сурьма . . . .	121,69	{ 121 123	— —	— —	— —
52	Te	Теллур . . . .	127,4	{ 126 128 130	— — —	— — —	— — —
53	I	Иод . . . . .	126,862	{ 127 124 126 128 129	— 0,10 0,10 2,30 27,10	123,864 123,867 125,865 127,863 —	0,28 0,23 0,24 0,26 —
54	Xe	Ксенон . . . . .	130,1	{ 130 131 132 134 136 133	4,20 20,70 26,40 10,30 8,80 —	129,961 130,860 131,859 133,857 135,855 —	0,27 0,28 0,29 0,30 0,31 —
55	Cs	Цезий . . . . .	132,74	133	—	—	—

Z	Обозначение	Элемент	Средний атомный вес	Изотопы M	Процент	Точные атомные веса ядер	Дефекты массы
56	Ba	Барий.....	137,28	{ (136)	—	—	—
				{ 138	—	—	—
57	La	Лантан ....	138,82	{ 139	—	—	—
58	Ce	Церий .....	140,1	{ 140	—	—	—
				{ 142	—	—	—
59	Pr	Празеодим .	140,8	{ 141	—	—	—
				{ 142	—	—	—
60	Nd	Неодим ....	144,17	{ 144	—	—	—
				{ (145)	—	—	—
				{ 146	—	—	—
61	Li	Иллиний ...	—	—	—	—	—
62	Sm	Самарий ...	150,35	—	—	—	—
63	Eu	Европий ...	151,9	—	—	—	—
64	Gd	Гадолиний .	156,9	—	—	—	—
65	Tb	Тербий.....	159,1	—	—	—	—
66	Dy	Диспрозий .	162,38	—	—	—	—
67	Ho	Хольмий ...	163,4	—	—	—	—
68	Er	Эрбий.....	167,5	—	—	—	—
69	Tm	Тулий .....	169,3	—	—	—	—
70	Yb	Иттербий ..	172,9	—	—	—	—
71	Sr	Кассиопей .	174,9	—	—	—	—
72	Hf	Гафний ....	178,5	—	—	—	—
73	Ta	Тантал ....	181,2	—	—	—	—
74	W	Вольфрам ..	184,0	—	—	—	—
75	Re	Рений.....	188,6	—	—	—	—
76	Os	Осмий .....	190,9	—	—	—	—
77	Ir	Иридий ....	192,93	—	—	—	—
78	Pt	Платина ...	195,1	—	—	—	—
79	Au	Золото.....	197,10	—	—	—	—
				{ 196	0,1	195,910	0,31
				{ 198	9,9	197,909	0,32
				{ 199	16,4	198,909	0,32
80	Hg	Ртуть.....	200,49	{ 200	23,8	199,908	0,33
				{ 201	13,7	200,908	0,34
				{ 202	29,3	201,907	0,34
				{ 204	6,8	203,906	0,36
				{ 203	—	—	—
				{ 205	—	—	—
81	Tl	Таллий ....	—	{ 207 (AcC <sup>*</sup> )	30	—	—
				{ 208 (ThC <sup>*</sup> )	70	—	—
				{ 210 (RaC <sup>*</sup> )	—	—	—
				{ 206 (RaG)	86,8	205,905	0,35
				{ 207 (AcD)	9,3	206,905	0,35
				{ 208 (ThD)	3,9	207,905	0,36
82	Pb	Свинец ....	207,11	{ (209)	—	—	—
				{ 210 (RaD)	—	—	—
				{ 211 (AcB)	—	—	—
				{ 212 (ThB)	—	—	—
				{ 212 (RaB)	—	—	—

Z	Обозначение	Элемент	Средний атомный вес	Изотопы M	Процент	Точные атомные веса ядер	Дефекты массы
83	Bi	Висмут . . .	208,89	{ 209 210 (RaE) 211 (AcC) 212 (ThC) 214 (RaC)	— — — —	— — — —	— — — —
84	Po	Полоний . . .	210	{ 210 (RaF) 211 (AcC') 212 (ThC') 214 (RaC') 215 (AcA) 216 (ThA) 218 (RaA)	— — — — — — —	— — — — — — —	— — — — — — —
85	Am	(Алабамий).	—	—	—	—	—
86	Rn	Радон . . . . .	222	{ 219 (An) 220 (Tn) 220 (Rn)	— — —	— — —	— — —
87	Va	(Виргиний).	—	—	—	—	—
88	Ra	Радий . . . . .	225,85	{ 223 (AcX) 224 (ThX) 226 (Ra) 228 (MsTh)	— — — —	— — 225,85?? —	— — 0,45?? —
89	Ac	Актиний . . .	227	{ 227 (Ac) 228 (MsTh <sub>2</sub> ) 227 (RaAc) 228 (RaTh)	— — — —	— — — —	— — — —
90	Th	Торий . . . . .	231,99	{ 230 (Jo) 231 (UY) 232 (Th) 234 (UX <sub>1</sub> )	— — — —	— — — —	— — — —
91	Pa	Протактиний	231	{ 231 (Pa) 234 (UX <sub>2</sub> ) 234 (Uz)	— — —	— — —	— — —
92	U	Уран . . . . .	238,05	{ 234 (Ull) 238 (U)	— —	238,05? —	0,27? —

В химии обычно применяется система, в которой средний вес нейтрального атома кислорода принят равным 16. В системе Астона  $O^{16}=16$  средний атомный вес кислорода будет 16,00085.

ОТДЕЛ II

**РЕНТГЕНОВСКАЯ АППАРАТУРА**



## § 1. Электротехнические величины и зависимости

Количество электричества заряженного конденсатора:  $Q = C \cdot U$ .

Энергия заряженного конденсатора:  $W = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}$ .

Сила притяжения обкладок плоского конденсатора:  $F = \frac{\epsilon}{8\pi} \cdot \frac{S}{d^2} \cdot U^2$ .

Напряженность электрического поля  $|E| = \text{grad } U$ :

Точечного заряда  $q$

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}.$$

Линейного заряда при плотности электричества  $\sigma = \frac{q}{L}$ ;

$$E = \frac{2\sigma}{\epsilon r}.$$

Плоского заряда при плотности электричества  $\sigma = \frac{q}{S}$ ;

$$E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}$$

Между плоскостями: при однородном диэлектрике

$$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} = -\frac{U}{d};$$

при слоевом диэлектрике

$$|E_k| = \text{grad } U_k = \frac{U}{\sum_{\epsilon_k} \frac{d_i}{\epsilon_i}}.$$

Шарового конденсатора

$$|E_x| = \text{grad } U_x = \frac{RrU}{x^2(R-r)}.$$

Цилиндрического конденсатора

$$|E_x| = \text{grad } U = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}}.$$

Наименование материала	Объемное сопротивление	Поверхностное сопротивление	
		в $\Omega$ см	
		Относительн. влажность 30%	Относительн. влажность 80%
1. Асфальт естественный .....	$10^{14} - 10^{15}$	—	—
2. Бакелит .....	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{10} - 10^{12}$	$10^8 - 10^{10}$
3. Бакелизированный картон .....	$10^{11} - 10^{13}$	$10^{10} - 10^2$	$10^8 - 10^9$
4. Бумага кабельная сухая .....	$10^{12} - 10^{13}$	—	—
5. Бумага кабельная пропитанная .....	$10^{15}$	—	—
6. Галалит .....	$10^{10}$	$6 \times 10^{10}$	$6 \times 10^8$
7. Дерево (дуб) парафинированное .....	$10^{13}$	$10^{13}$	$10^9$
8. Кварц плавленный .....	$10^{16}$	$10^{15}$	$3 \times 10^{12}$
9. Лакированная материя (экспедиционер)	$10^{12} - 10^{13}$	—	—
10. Масло трансформаторное .....	$10^{12} - 10^{13}$	—	—
11. Миканит .....	$10^{15}$	$10^{14}$	$10^9$
12. Мрамор .....	$10^9 - 10^{11}$	$10^{11}$	$10^7$
13. Парафин .....	$10^{15} - 10^{16}$	$10^{16}$	$4 \times 10^{15}$
14. Прессшпан .....	$10^{11} - 10^{12}$	—	—
15. Сера .....	$10^{17}$	$10^{16}$	$10^{14}$
16. Слюда мусковит .....	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{14}$	$10^{11}$
17. Слюда флогопит .....	$10^{12} - 10^{14}$	$10^{13}$	$4 \times 10^{10}$
18. Стекло .....	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{14}$	$10^7$
19. Стеатит (мелалит) .....	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{14}$	—
20. Фибра .....	$10^9 - 10^{10}$	$3 \times 10^{10}$	$10^7$
21. Фарфор .....	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{13}$	$10^9$
22. Шеллак .....	$10^{15} - 10^{16}$	$2 \times 10^{14}$	$6 \times 10^9$
23. Шифер .....	$10^7 - 10^{10}$	$2 \times 10^8$	$10^7$
24. Церезин .....	$10^{16}$	$8 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{16}$
25. Целлулоид .....	$2 \times 10^{10}$	$8 \times 10^{10}$	$8 \times 10^9$
26. Целлон .....	$2 \times 10^{10}$	$6 \times 10^{11}$	$6 \times 10^8$
27. Электроза желтая .....	$10^{15}$	$10^{15}$	$5 \times 10^8$
28. Эбонит .....	$10^{17}$	$6 \times 10^{16}$	$10^{10}$

при температуре  $t = 15 - 25^{\circ} \text{C}$ 

Электрическ. прочность		Диэлектриче- ский коэффициент	Угол потерь	Частота, при ко- торой производи- лось измерение угла потерь пер./сек. (Hz)
Толщина в мм	Пробивное напряжение KV в мм			
3,6	14	2,7	—	—
1	13 — 23	5,2 — 8	10 — 30	$10^6$
10	8 — 10	4,5 — 6	10 — 45	50
0,15	6 — 9	2,3 — 3,5	5 — 10	350
0,15	10 — 25	3,4 — 3,7	15 — 20	50
—	6 — 8,5	—	—	—
10	4 — 7	4,5 — 5	—	—
1,2	30	3,5 — 3,6	0,12	$10^6$
0,1	50 — 80	3,5 — 5,5	20 — 30	—
1	$5 \approx 15^1$	2,15 — 2,5	5	50
3	15 — 20	4,5 — 6	—	—
10	3,5 — 5,5	8,3	—	—
2	15 — 30	2,1 — 2,2	0,05	500
1	9 — 14	2,5 — 4	26	$10^4$
—	—	2,4 — 4	—	—
0,05	120 — 200	6 — 7,5	0,1 — 0,2	$5 \times 10^3$
0,05	80 — 150	4 — 6	—	—
—	10 — 40	5,5 — 10	0,4 — 10	$10^6$
10	15	4,1 — 5	5 — 10	—
3	5 — 11	2,5 — 8,2	70	$10^6$
20	6 — 15	4,5 — 6,5	12 — 27	50
—	—	2,7 — 3,7	—	—
10	1,5 — 3	6 — 7,5	90	950
0,2	15	2,1 — 2,2	0,03	500
0,2	10 — 25	4 — 16	40	$10^6$
0,1	15 — 25	3,5	40	1000
3	25	—	—	—
5	8 — 10	2 — 3,5	2,5 — 23	1000

<sup>1</sup> Сильно зависит от чистоты масла

## Диэлектрический коэффициент при 18°

Асфальт . . . . .	2,7	Плавиковый шпат . . . . .	6,8
Анилин . . . . .	7,2	Сильвин . . . . .	4,9
Ацетон . . . . .	21	Соль каменная . . . . .	5,6
Бензол . . . . .	2,3	Слюда . . . . .	6—8
Бумага . . . . .	2—2,5	Спирт метилов . . . . .	33
Вода . . . . .	81	этиловый . . . . .	26
Гуттаперча . . . . .	4,4	Стекло обычное . . . . .	5—7
Дерево (сухое) . . . . .	2—8	Оптическое стекло . . . . .	до 10
Исландск. шпат		Сера . . . . .	3,6—4,3
оси . . . . .	8	Сероуглерод . . . . .	2,6
⊥ оси . . . . .	8,5	Скипидар . . . . .	2,3
Касторовое масло . . . . .	4,67	Толуол . . . . .	2,3
Каучук . . . . .	2,2—3	Фарфор . . . . .	6
Кварц		Шеллак . . . . .	3—3,7
оси . . . . .	4,7	Эбонит . . . . .	2,7
⊥ оси . . . . .	4,4	Эфир серный . . . . .	4,4
Кварц плавленн. . . . .	3,7	Янтарь . . . . .	2,8
Керосин . . . . .	2	Сернистый газ . . . . .	1,010
Ксилол . . . . .	2,2—2,6	Аммиак . . . . .	1,0084
Мрамор . . . . .	8,3	Углекислый газ . . . . .	1,00097
Муравьиная кислота . . . . .	58	Азот . . . . .	1,000606
Нитробензол . . . . .	36	Воздух . . . . .	1,000590
О-Нитротолуол . . . . .	27,8	Кислород . . . . .	1,000547
Парафин . . . . .	2	Водород . . . . .	1,000264
Парафиновое масло . . . . .	2,2	Гелий . . . . .	1,000074

## Сопротивление изоляторов

При оценке изолирующей способности непроводников придется принимать в расчет не только величину  $\rho$ , аналогичную удельному сопротивлению, но и некоторую величину  $\sigma$ , называемую поверхностным сопротивлением и представляющую собой сопротивление куска поверхности длиной и шириной в 1 см. Эта величина зависит от влажности воздуха.

М а т е р и а л	$\sigma$ 50% влаж- ности	$\sigma$ 70% влаж- ности	$\sigma$ 90% влаж- ности	$\rho$ см
Кварц плавленный.....	$3 \times 10^{12}$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^8$	$5 \times 10^{18}$
Эбонит новый.....	$3 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{14}$	$2 \times 10^9$	$1 \times 10^{18}$
Слюда бесцветная.....	$2 \times 10^{13}$	$4 \times 10^{11}$	$8 \times 10^9$	$2 \times 10^{17}$
Сера.....	$7 \times 10^{15}$	$4 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{17}$
Янтарь.....	$6 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{16}$
Каучук.....	$6 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{14}$	$5 \times 10^{16}$
Парафин.....	$9 \times 10^{15}$	$7 \times 10^{15}$	$6 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{16}$
Шеллак.....	$6 \times 10^{13}$	$3 \times 10^{13}$	$7 \times 10^9$	$1 \times 10^{16}$
Сургуч.....	$2 \times 10^{15}$	$6 \times 10^{14}$	$9 \times 10^{13}$	$8 \times 10^{15}$
Стекло особого сорта.....	$4 \times 10^{12}$	$4 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	$8 \times 10^{15}$
Воск.....	$6 \times 10^{14}$	$6 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{15}$
Фарфор неглазурованн.....	$6 \times 10^{14}$	$7 \times 10^9$	$5 \times 10^7$	$3 \times 10^{14}$
Парафинир. красное дерево.....	$4 \times 10^{12}$	$5 \times 10^{11}$	$7 \times 10^9$	$4 \times 10^{13}$
Стекло зеркальное.....	$5 \times 10^{10}$	$6 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2 \times 10^{13}$
Мрамор итальянск.....	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^8$	$2 \times 10^7$	$1 \times 10^{11}$
Целлулоид.....	$5 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{10}$	$2 \times 10^9$	$2 \times 10^{10}$
Фibra красная.....	$2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^9$	$2 \times 10^8$	$5 \times 10^9$
Слоновая кость.....	$5 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	$3 \times 10^7$	$2 \times 10^8$
Шифер.....	$9 \times 10^7$	$3 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^8$

Амплитудные значения разрядных напряжений в КВ для случая двух одинаковых сфер по Франку

Расстояние в см	а) $D = 2$ см		$D = 5$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
0,1	4,65	4,65	4,65	4,65
0,2	8,13	8,08	8,03	8,03
0,3	11,44	11,29	11,28	11,28
0,4	14,54	14,41	14,40	14,35
0,5	17,60	17,45	17,47	17,33
0,6	20,68	20,48	20,44	20,21
0,7	23,59	23,39	23,36	23,16
0,8	26,30	26,15	26,25	26,03
0,9	28,90	28,73	29,08	28,83
1,0	31,20	31,20	31,90	31,70
1,1	33,35	33,50	34,71	34,45
1,2	35,28	35,68	37,45	37,22
1,3	36,98	37,76	40,22	39,93
1,4	37,50	38,31	42,97	42,57
1,5	40,03	41,70	45,54	45,20
1,6	41,33	43,47	48,04	47,70
1,7	42,71	45,20	50,48	50,22
1,8	43,84	46,83	52,80	52,73
1,9	44,85	48,20	55,00	55,10
2,0	45,80	49,70	57,25	57,48
2,5	49,98	55,72	67,20	68,50
3,0	52,70	60,48	75,60	78,20
4,0	56,87	67,08	88,63	94,87
5,0	—	—	97,75	108,0
6,0	—	—	104,8	118,5
7,0	—	—	110,2	127,1
8,0	—	—	114,3	134,3
9,0	—	—	117,8	139,9
10,0	—	—	120,7	144,8

Расстояние в см	б) $D = 6,25$ см		$D = 10$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
0,1	4,65	4,65	4,65	4,65
0,2	8,04	8,04	8,05	8,05
0,3	11,29	11,28	11,28	11,28
0,4	14,40	14,37	14,37	14,37
0,5	17,46	17,38	17,43	17,43
0,6	20,53	20,35	20,38	20,38
0,7	23,58	23,30	23,28	23,28
0,8	26,35	25,98	26,20	26,17
0,9	29,25	28,90	29,13	29,02
1,0	32,00	31,70	32,05	31,88
1,1	34,75	34,50	34,91	34,62
1,2	37,56	37,26	37,77	37,40
1,3	40,29	40,00	40,60	40,20
1,4	43,04	42,74	43,40	43,00
1,5	45,72	45,44	46,18	45,72
1,6	48,45	48,12	48,98	48,38
1,7	51,10	50,77	50,86	50,20
1,8	53,60	53,25	54,52	53,78
1,9	56,11	55,80	57,35	56,51
2,0	58,64	58,38	60,10	59,20
2,5	69,92	70,10	73,10	72,20
3,0	79,70	80,85	85,40	84,50
4,0	95,60	99,45	107,2	107,1
5,0	107,3	115,2	125,0	127,0
6,0	116,2	128,2	139,8	144,7
7,0	123,2	136,9	152,0	160,5
8,0	128,8	148,0	162,0	174,7
9,0	133,8	155,7	170,7	187,6
10,0	137,6	162,8	177,0	198,5
12,0	143,8	173,0	189,8	217,4
14,0	—	—	199,5	233,0
15,0	—	—	202,2	239,5
16,0	—	—	206,1	245,7
18,0	—	—	210,8	256,0
20,0	—	—	216,1	264,8

Расстояние в см	в) $D = 12,5$ см		$D = 15$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
0,1	4,65	4,65	4,64	4,64
0,5	17,46	17,46	17,48	17,48
1,0	32,07	32,00	32,08	32,02
1,5	46,62	46,23	46,27	45,90
2,0	59,96	59,37	60,00	59,48
2,5	73,40	72,58	73,67	72,70
3,0	86,22	85,40	86,94	85,82
4,0	110,1	109,4	111,8	110,4
5,0	130,8	131,2	134,1	133,4
6,0	148,5	150,9	154,3	154,7
7,0	164,0	168,6	172,1	174,1
8,0	177,2	184,9	188,3	192,0
9,0	188,0	200,0	202,0	208,6
10,0	197,7	213,6	213,8	224,3
12,0	213,6	237,0	233,3	251,7
14,0	225,0	257,0	249,3	275,0
15,0	230,3	265,5	255,8	285,2
16,0	235,0	273,3	262,4	294,5
18,0	242,8	287,2	272,4	312,2
20,0	249,6	299,4	280,7	327,0
25,0	262,0	322,4	296,1	357,7
30,0	—	—	307,5	379,7



Расстояние в см	г) $D = 25$ см		$D = 50$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
0,5	17,53	17,53	17,58	17,58
1,0	32,15	32,15	32,35	32,35
1,5	46,30	46,20	46,50	46,50
2,0	60,18	59,90	60,13	60,13
2,5	73,80	73,45	71,00	71,00
3,0	87,18	86,70	87,50	87,40
4,0	113,8	112,5	114,2	113,8
5,0	139,3	137,7	140,7	139,7
6,0	163,6	161,8	166,3	164,8
7,0	187,1	184,7	192,0	190,5
8,0	208,2	206,7	217,2	215,1
9,0	228,9	227,7	242,3	239,0
10,0	247,2	248,0	265,8	263,4
12,0	281,0	284,8	312,3	309,4
14,0	309,6	317,7	357,0	352,8
15,0	322,3	333,7	377,4	374,0
16,0	333,4	348,8	397,6	394,0
18,0	353,7	377,5	436,0	433,8
20,0	370,4	401,8	471,7	471,5
25,0	405,2	455,4	549,6	558,5
30,0	431,0	498,0	612,0	634,5
35,0	451,0	532,0	664,2	703,7
40,0	464,3	560,7	706,0	765,0
50,0	484,3	604,0	769,0	865,7
60,0	—	—	817,0	947,0
70,0	—	—	852,5	1013
80,0	—	—	879,8	1068
90,0	—	—	902,0	1112
100,0	—	—	918,0	1148

Расстояние в см	д) $D = 75$ см		$D = 100$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
1,0	32,47	32,44	32,38	32,38
2,0	60,50	60,50	60,54	60,54
3,0	87,73	87,73	88,00	88,00
4,0	113,5	113,3	114,8	114,8
5,0	141,3	140,8	141,7	141,7
6,0	167,5	166,8	168,1	168,0
7,0	193,7	192,4	194,3	193,8
8,0	219,2	217,3	220,3	219,7
9,0	244,7	242,3	246,2	245,1
10,0	270,0	267,2	272,0	270,4
12,0	319,5	315,8	322,0	319,6
14,0	368,0	363,2	371,6	369,0
16,0	414,7	409,0	420,0	416,0
18,0	459,0	454,3	468,0	463,0
20,0	503,0	496,5	514,3	509,2
25,0	603,2	598,0	626,0	618,7
30,0	693,0	692,3	729,2	722,4
35,0	771,0	778,3	825,0	819,2
40,0	840,0	857,0	912,3	909,0
50,0	950,0	998,0	1060	1075
60,0	1031	1120	1181	1221
70,0	1098	1220	1277	1350
80,0	1151	1307	1355	1467
90,0	1193	1394	1423	1570
100,0	1228	1449	1478	1659
110,0	1258	1508	1566	1813
120,0	1284	1559	1566	1813
150,0	1336	1678	1655	1993
200,0	—	—	1753	2198

Расстояние в см	е) $D = 150$ см		$D = 200$ см	
	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения	Один шар заземлен	Симметричное распределение напряжения
5,0	141,8	141,8	142,5	142,5
10,0	273,0	272,8	273,8	273,8
15,0	400,3	398,6	402,8	401,5
20,0	523,4	520,0	528,4	525,6
25,0	642,0	636,5	650,0	645,5
30,0	759,0	751,0	770,0	765,0
35,0	870,5	858,5	887,4	878,0
40,0	975,0	962,0	1000	989,0
50,0	1170	1157	1215	1199
60,0	1344	1338	1417	1397
70,0	1494	1502	1602	1584
80,0	1626	1651	1770	1760
90,0	1738	1792	1922	1925
100,0	1837	1922	2060	2078
110,0	1920	2044	2182	2220
120,0	1995	2152	2293	2354
150,0	2173	2435	2558	2725
200,0	2373	2785	2863	3200
250,0	2496	3040	3075	3560
300,0	2579	3222	3155	3840
350,0	—	—	3322	4067
400,0	—	—	3397	4240

Для получения эффективных значений переменного напряжения делить при правильной форме кривой на  $\sqrt{z}$ .

Поправка на давление и температуру.

$U_0$  — напряжение, взятое из таблиц, соответствующее нормальным условиям (760 мм Hg; 20° C).

$U$  — напряжение, соответствующее данным условиям

$$U = U_0 \frac{(273 + t)760}{(273 + 20)p}$$

где  $p$  — давление в мм Hg,  $t$  — температура в градусах Цельсия.

Емкость уединенных проводящих тел

Шар радиуса  $R$  в среде с диэлектрическим коэффициентом  $\epsilon$ :

$$C = \epsilon R.$$

Эллипсоид вращения вокруг большей оси  $a$  ( $b = c$  и  $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ ):

$$C = \frac{2 \epsilon \cdot a \cdot e}{\ln \frac{1+e}{1-e}}$$

Эллипсоид вращения вокруг малой оси  $b$  ( $a = c$  и  $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ ):

$$C = \frac{\epsilon \cdot a \cdot e}{\operatorname{arcsin} e}$$

Два соприкасающихся шара радиуса  $R$ :

$$C = 2\epsilon R \ln 2.$$

Тонкий диск радиуса  $R$ :

$$C = \frac{2\epsilon R}{\pi}.$$

Круговой цилиндр радиуса  $R$  и длины  $L \gg R$ :

$$C = \frac{\epsilon L}{2 \ln \frac{L}{R}}.$$

### Емкость конденсаторов

Плоский конденсатор при равномерном поле и однородном диэлектрике:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}.$$

Плоский конденсатор при слоистом диэлектрике:

$$C = \frac{S}{4\pi \sum_1^n \frac{d_i}{\epsilon_i}}.$$

Два параллельных диска радиуса  $R$  толщиной  $b$ , на расстоянии  $d$  ( $R \gg b$  и  $R \gg d$ ):

$$C = \frac{\epsilon R^2}{4d} + \frac{\epsilon R}{4\pi} \left[ 1 + \ln \frac{16\pi(b+d)R}{d^2} + \frac{b}{d} \cdot \ln \frac{b+d}{d} \right].$$

Две длинных параллельных ленты длиной  $L$ , шириной  $b$ , на расстоянии  $d$ :

$$C = 0,0254L \left\{ \frac{\pi b + d}{d} + \ln \left[ \frac{\pi b + d}{d} + \ln \frac{\pi b + d}{d} \right] \right\}.$$

Щаровой конденсатор:

$$C = \frac{\epsilon Rr}{R-r}.$$

Две сферы радиусов  $R_1$  и  $R_2$  при расстоянии между центрами  $d$  ( $d \gg R_1$  и  $d \gg R_2$ ):

$$C = \frac{\epsilon R_1 R_2 d}{(R_1 + R_2)d - 2R_1 R_2}.$$

Плоскость и сфера радиуса  $R$ , центр которой на расстоянии  $d$  ( $d \gg R$ ):

$$C = \epsilon R \left( 1 + \frac{R}{2d} \right).$$

Цилиндрический конденсатор длиной  $L$ :

$$C = \frac{\epsilon L}{2 \ln \frac{R}{r}}.$$

Два эксцентрических цилиндра радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , расположенных один внутри другого при расстоянии между осями  $d$ :

$$C = \frac{\varepsilon L}{2 \ln \frac{1}{2R_1 R_2} [R_1^2 + R_2^2 + A^2]},$$

где

$$A^2 = \sqrt{(R_1^2 - R_2^2)^2 - 2d^2 (R_1^2 + R_2^2) - d^4}.$$

Два параллельных цилиндра радиусов  $R_1$  и  $R_2$  один вне другого, при расстоянии между осями  $d$ :

$$C = \frac{\varepsilon L}{2 \ln \frac{1}{2R_1 R_2} [d^2 - (R_1^2 + R_2^2) + A^2]},$$

где

$$A^2 = \sqrt{d^4 - 2d^2 (R_1^2 + R_2^2) + (R_1^2 - R_2^2)^2};$$

если

$$d \gg R_1 \text{ и } d \gg R_2,$$

то

$$C = \frac{\varepsilon L}{2 \ln \frac{d^2}{R_1 R_2}}.$$

Плоскость и цилиндр радиуса  $R$ , длиной  $L$ , при расстоянии оси от плоскости  $d$ :

$$C = \frac{\varepsilon L}{2 \ln \left[ \frac{d + \sqrt{d^2 + R^2}}{R} \right]};$$

если

$$L \gg d \quad R,$$

то

$$C = \frac{\varepsilon L}{2 \ln \frac{2d}{R}}.$$

Термоэлектродвижущие силы (при комнатной температуре)

(Микровольты на градус)

Платина — платина + 10% родий	—	6,4
" — железо		18,1
" — висмут	~	500
" — теллур	~	500
Висмут — теллур	~	550
Висмут — сурьма	~	100
Константан — медь	~	40
" — серебро	~	40
" — железо		52

Сила электрического тока:  $i = \frac{dq}{dt}$ .

Мощность в цепи постоянного тока:  $P = J \cdot U$ .

Активная мощность в цепи переменного тока:  $P_a = J \cdot U \cos \varphi$ .

Активная мощность в цепи трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз:  $P_{\text{л}} = \sqrt{3} J_a U_a \cos \varphi$ .

Термоионная эмиссия:

плотность тока эмиссии по Ричардсону  $j = a T^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{b}{T}}$ ,

или, более точно, по Дешмэну  $j = a T^2 e^{-\frac{b}{T}}$ .

Для практически существенных значений температуры  $T$  обе формулы дают близкие результаты.

По Дешмэну для всех чистых металлов

$$a = 60,2 \frac{A}{\text{см}^2 \text{град}^2}.$$

Для оксидов „ $a$ “ изменяется в широких границах от  $10^{-12}$  до 167.

Постоянная  $b = \frac{A_s}{k}$ , где  $A_s$  — работа выхода электрона из данного металла и  $k$  постоянная Больцманна.

Таблица 17

Значение постоянной  $b$  по Дешмэну

Z	Э л е м е н т	b
20	Кальций.....	$26,0 \times 10^3$
39	Итрий.....	$37,0 \times 10^3$
40	Цирконий.....	$38,0 \times 10^3$
42	Молибден.....	$50,0 \times 10^3$
58	Церий.....	$35,6 \times 10^3$
73	Тантал.....	$51,0 \times 10^3$
74	Вольфрам.....	$52,6 \times 10^3$
92	Уран.....	$38,0 \times 10^3$

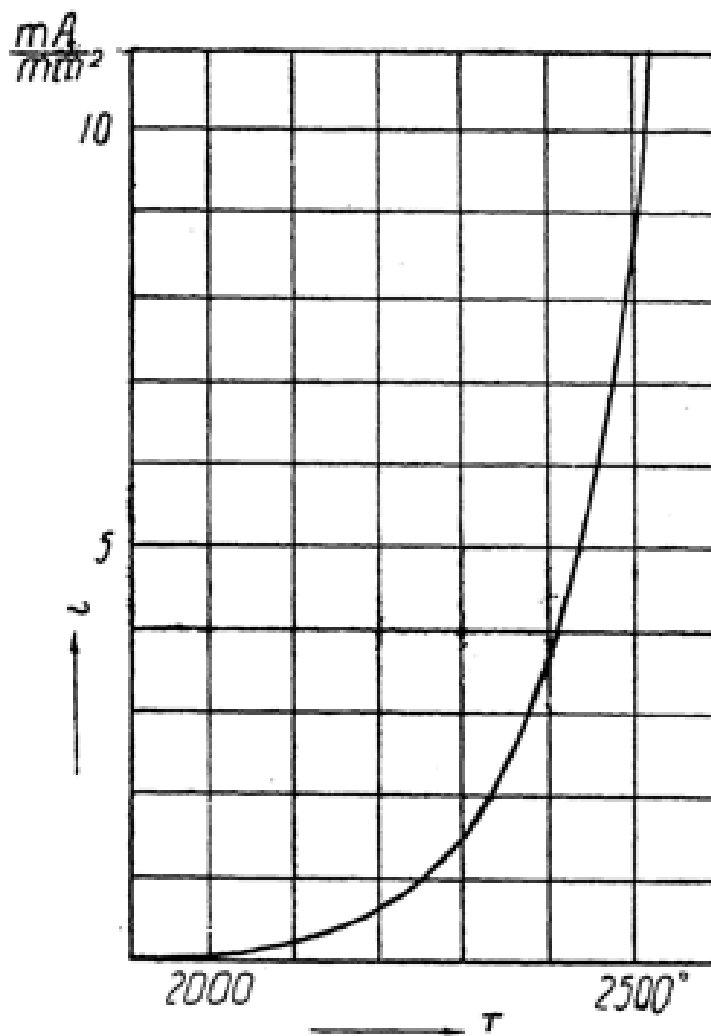


Рис. 1. Плотность эмиссионного тока насыщения в зависимости от температуры вольфрамовой нити.

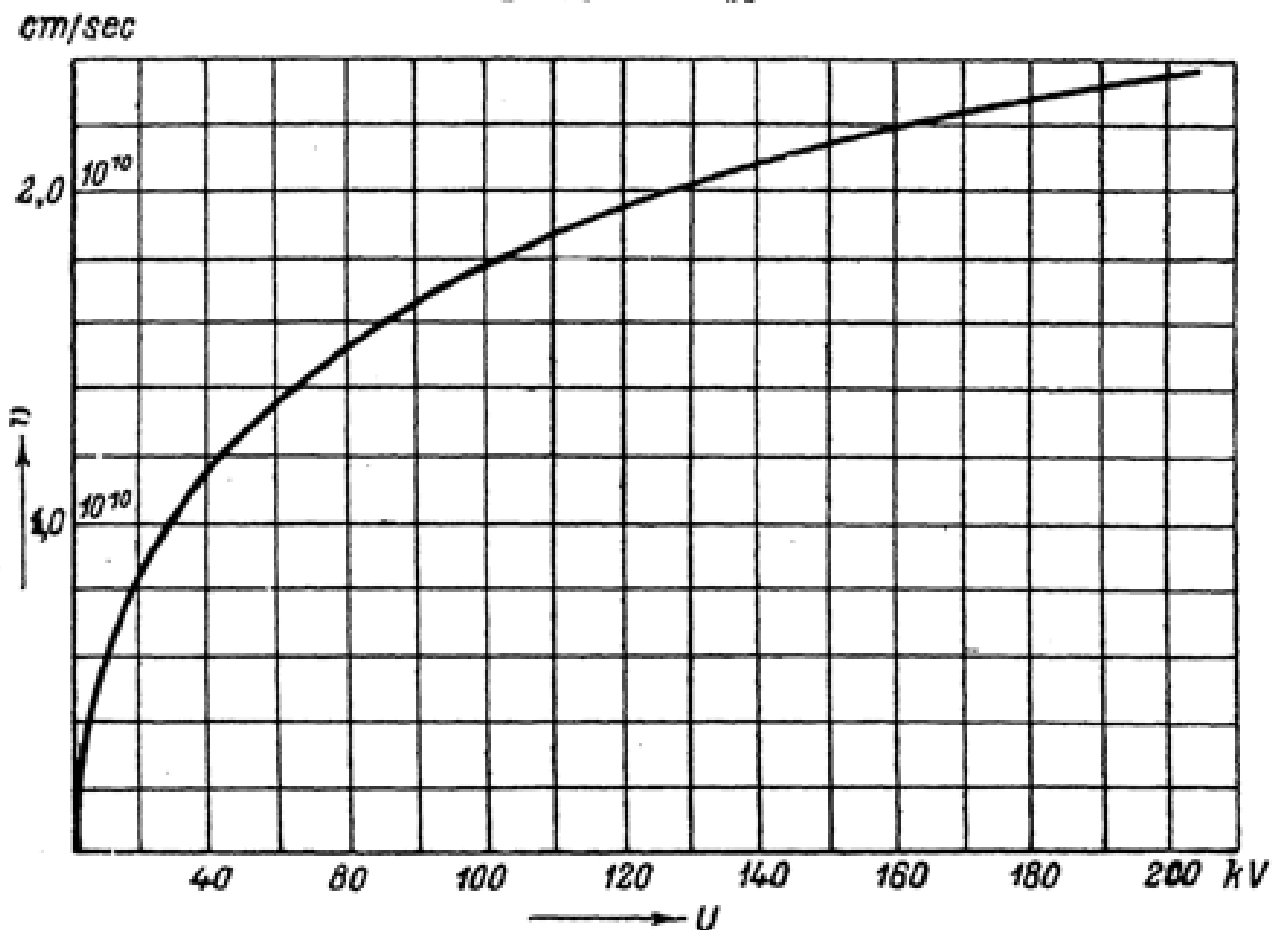


Рис. 2. Скорость электронов катодного пучка в зависимости от разгоняющего потенциала.

## § 2. Рентгеновские трубки и аппараты

Таблица 17а

### Рентгеновские трубки

Некоторые типичные данные

Тип трубки	Размеры фокусного пятна	Рабочее напряжение (постоянное)	Ток накала А	Напряжение накала V	Анодный ток		Охлаждение
					Длительный mA	Секундный mA	
Диагностические (проецирование и снимки)	Круглый $d=3$ мм	60—100	3—5	4—8	4—6	15—30	Водяное или воздушное
	Штриховой от $1,5 \times 1,5$ мм <sup>2</sup> до $4 \times 4$ мм <sup>2</sup>	60—100	3—5	5—10	8—10	100—200	То же
Терапевтические и-проецирование металлов	Круглый $d = 10—15$ мм	80—200	3—4	4—8	4—8	—	Лучеспускателем или термосифонное
	Штриховой	В зависимости от материала анода от 60 до 100	3—4	4—8	5—10	—	Водяное
Для структурного анализа (с люциферанновским окном)		5—15	3—4	3—6	10	—	Водяное или воздушное
Для получения лучей Буки	Круглый	до 400	3—4	4—8	4—8	—	Принудительное масляное
С вращающимся анодом для снимков	Острый	40—90	7—8	12	10	100	Воздушное



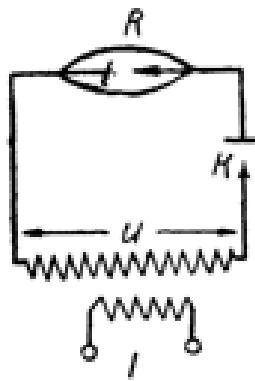
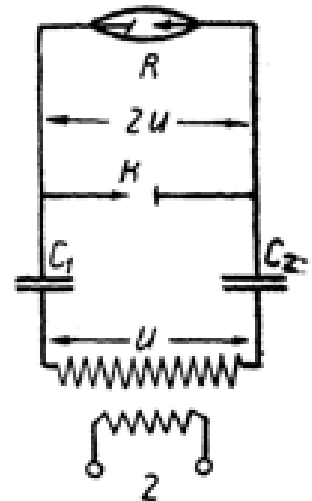


Рис. 3. Типичные схемы аппаратов с прерывисто-синусоидально-пульсирующим напряжением:



- 1) Схема однокенотронного выпрямления без удвоения напряжения (пульсация от  $U'_{\max}$  до 0), 2) Схема однокенотронного выпрямления с удвоением напряжения по Вилларду (пульсация от  $2 U'_{\max}$  до 0).

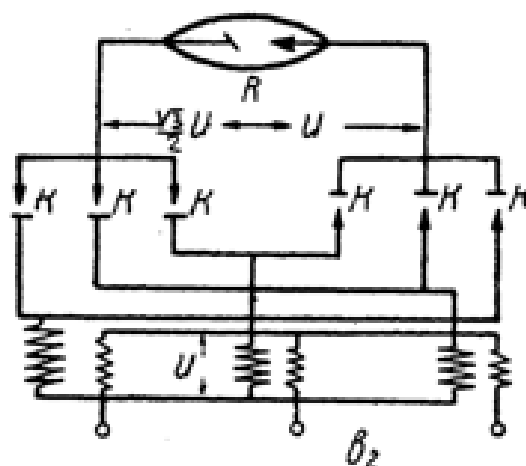
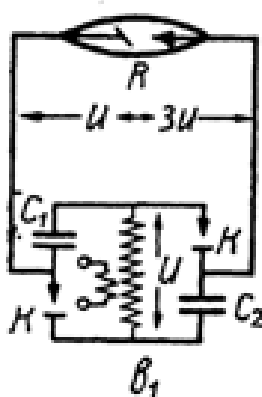
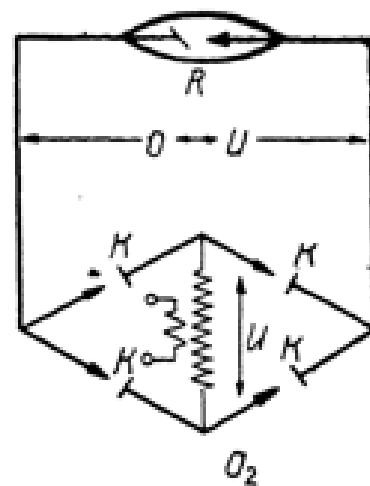
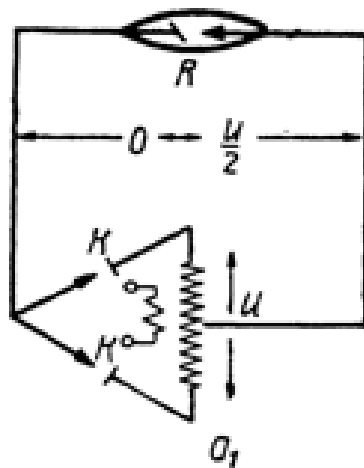


Рис. 4. Типичные схемы выпрямления для синусоидально-пульсирующего напряжения: а) пульсация от  $U$  до 0; б) пульсация от  $U_2$  и  $U_1$ :

- а<sub>1</sub>) схема двухкенотронного выпрямления с использованием половины трансформаторного напряжения; а<sub>2</sub>) схема четырехкенотронного выпрямления по Грецу; б<sub>1</sub>) схема двухкенотронного выпрямления с утроением по Витка; б<sub>2</sub>) схема шестикенотронного выпрямления трехфазного аппарата.

<p>Схема выпрямления</p>	<p>Характеристика рабочего напряжения</p>
<p>1. Без выпрямления и однокенотронное без конденсаторов</p>	<p>Одна полуволна синусоидального напряжения, пульсирующего от 0 до <math>U'_{\max}</math> с нормальным периодом пульсами</p> $U_{\max} \approx U'_{\max}$
<p>2. Однокенотронное с конденсаторами по Вилларду</p>	<p>Синусоидально пульсирующее напряжение от 0 до <math>U_{\max}</math> с двойным периодом пульсации (период синусоиды)</p> $U_{\max} 2 \approx U'_{\max}$
<p>3. Четырехкенотронное по Грещу без конденсаторов</p>	<p>Выпрямленное синусоидальное напряжение, пульсирующее от 0 до <math>U_{\max}</math> с нормальным периодом пульсации (полупериод синусоиды):</p> $U_{\max} = U'_{\max}$
<p>4. Двухкенотронное с конденсаторами по Витка</p>	<p>Синусоидально пульсирующее напряжение от <math>\frac{U_{\max}}{3}</math> до <math>U_{\max}</math> с двойным периодом пульсации</p> $U_{\max} \approx 3 U'_{\max}$
<p>5. Трехфазное по Грещу</p>	<p>Синусоидально пульсирующее напряжение от <math>0,88 U_{\max}</math> до <math>U_{\max}</math> с укороченным периодом пульсации (треть полупериода синусоиды)</p> $U_{\max} = \sqrt{3} U'_{\max}$
<p>6. Двухкенотронное с конденсаторами по Грейнахеру и четырехкенотронное по Грещу с конденсаторами</p>	<p>Постоянное:</p> $U_{\max} = 2U'_{\max}$ $U_{\max} = U'_{\max}$

Примечание 1.  $U'_{\max}$  — максимальное значение напряжения на выво

Примечание 2. Для механического выпрямления с конденсаторами саторов она является неопределенной, но коэффициент амплитуды кривой

## рентгеновских аппаратов

Эффективное значение напряжения	Коэффициент амплитуды $K = \frac{U_{\max}}{U_{\text{eff}}}$
$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (U'_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = 0,7 U'_{\max}$	(за полуволну) 1,43
$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U'_{\max} + U'_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = 1,22 U'_{\max}$	1,64
$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (U'_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = 0,7 U'_{\max}$	1,43
$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (2U'_{\max} + U'_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = 2,12 U'_{\max}$	1,43
$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{6}{T} \int_{\frac{T}{6}}^{\frac{T}{3}} (\sqrt{3} U'_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = 1,66 U'_{\max}$	1,04
$U_{\text{eff}} = 2 U'_{\max}$ $U_{\text{eff}} = U'_{\max}$	1 1

дах трансформатора.

форма кривой напряжения совпадает со случаем 6. При отсутствии кондендупустимо считать лежащим между значениями для случаев 2-го и 3-го.

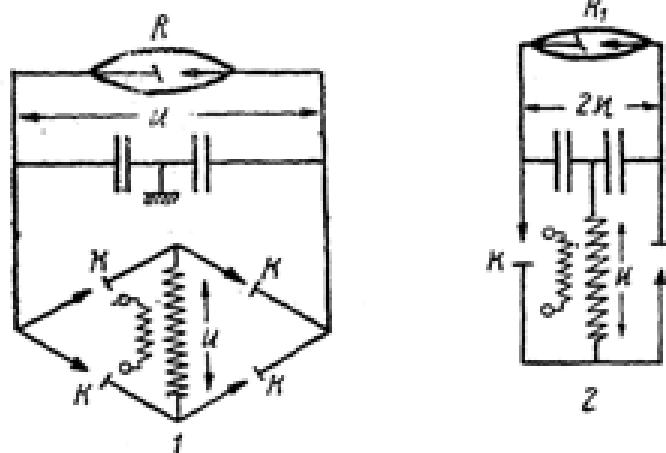


Рис. 5. Типичные схемы выпрямления для постоянного напряжения.

1. Схема без удвоения напряжения.
2. Схема с удвоением напряжения по Грейнахеру.

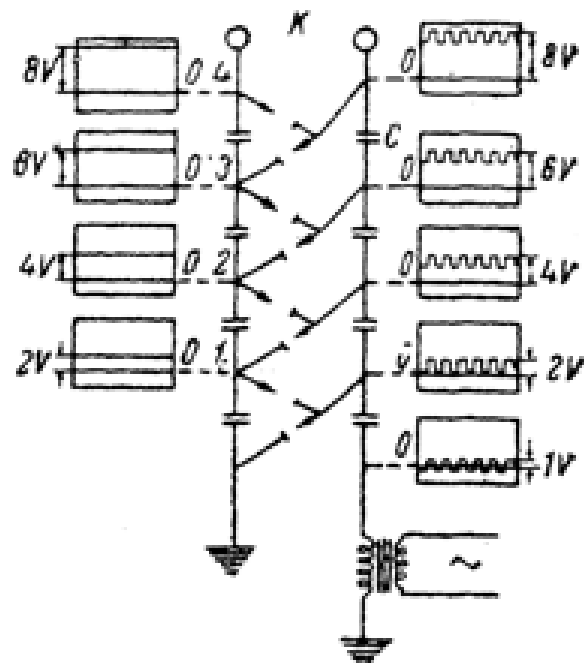


Рис. 6. Схема многократного умножения по Кокрофту.

### § 3. Спектрометры

Формула Бреггов:

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

- где  $n = 1, 2, 3 \dots$  порядок отражения,  
 $d$  — расстояние между сетчатыми плоскостями кристалла,  
 $\theta$  — угол наклона лучей к отражающей плоскости,  
 $\lambda$  — длина волны рентгеновских лучей.

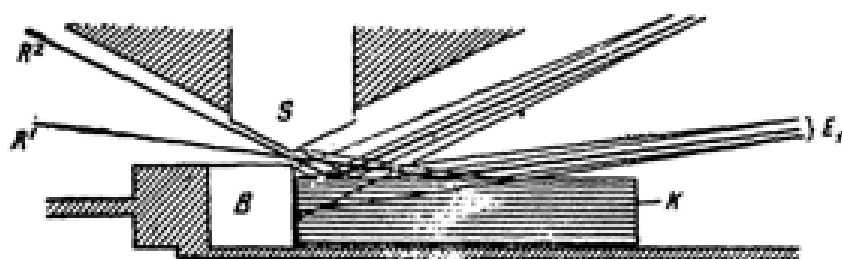


Рис. 7. Принципиальная схема спектрографа Зеемана (метод щели).

С помощью отражения от кристалла можно выделить из смешанного пучка однородные лучи какой-либо из присутствующих в сплошном спектре (результативный спектр при смещении непрерывного и характеристического спектра) длин волн.

Прибор, предназначенный для получения спектра и измерений длин волн, называется спектрометром или спектрографом, если имеется автоматическая запись.

Принципиальная схема действия и внешний вид некоторых типов спектрографов (метод щели) показан на рис. 7.

Для лучей с большой длиной волны применяются вакуумные спектрометры.

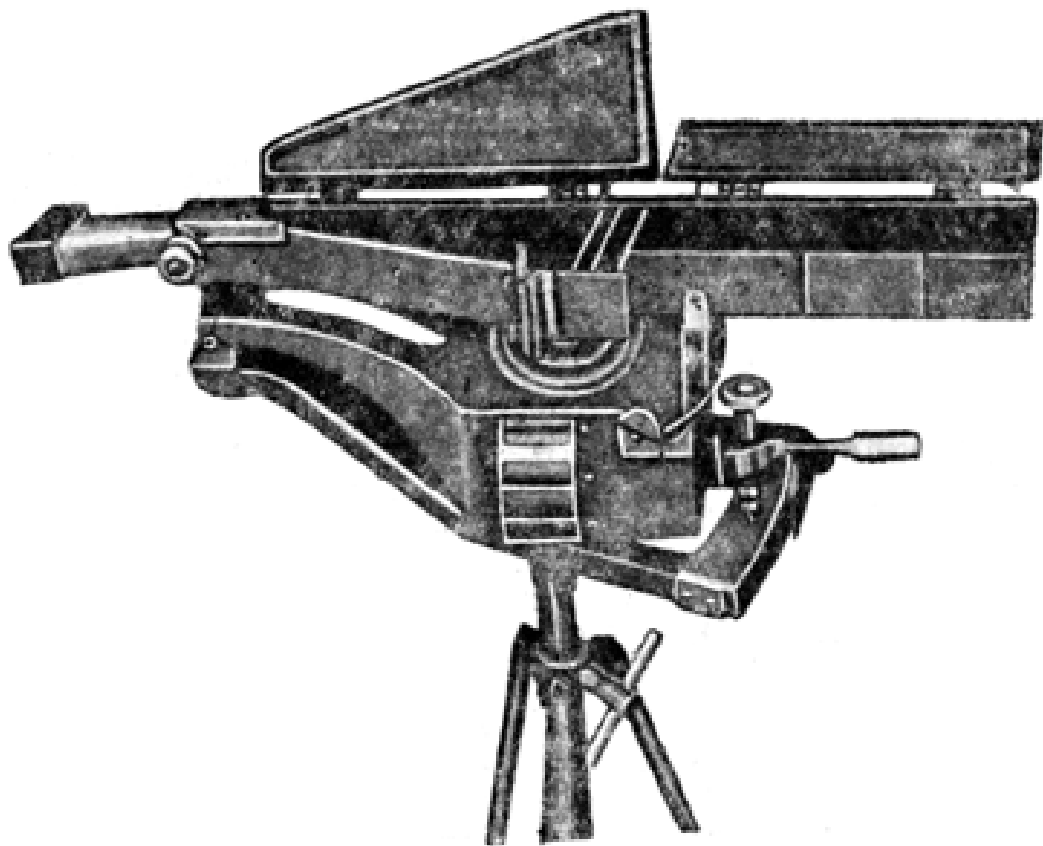


Рис. 8. Общий вид спектрографа Зеемана.

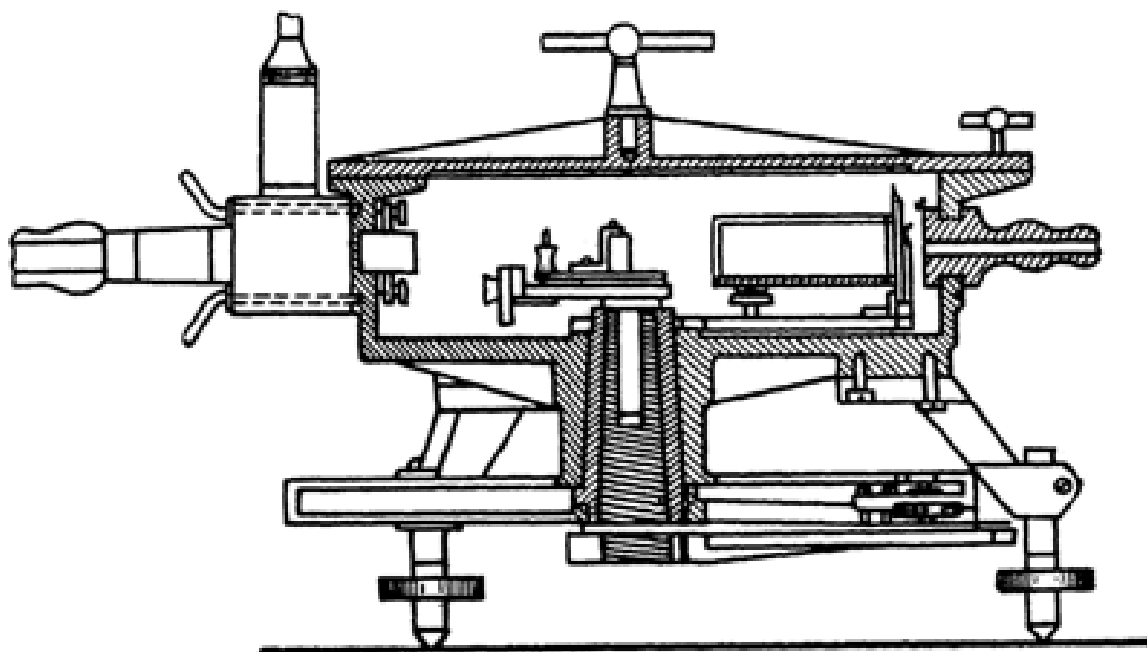


Рис. 9. Вакуумный спектрограф Зигбана.

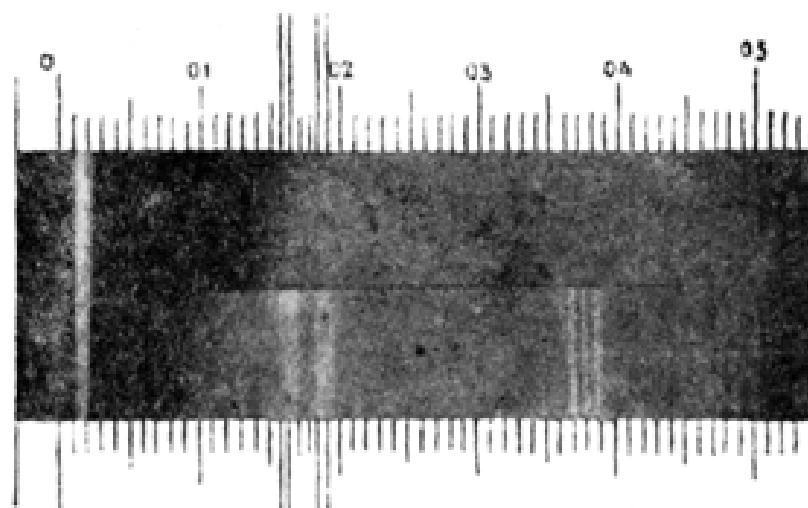


Рис. 10. Спектрограмма, снятая с помощью спектрографа Зеемана, с усилительными экранами для двух различных напряжений.

Таблица 18

Постоянные спектрографов

Спектрограф	Метод	Расстояние кристаллической пластинки в мм	Кристалл	Участок длин волн в X	Расстояние в 1 мм на пластинке или пленке соответств. разн. длин волн в X
Хаддинг	Вращающ. кристалл	60	Каменная соль	1000	46,1
"	"	60	" "	2000	43,8
"	"	60	" "	3000	39,8
"	"	60	Известков. шпат	1000	49,9
"	"	60	" "	2000	47,6
"	"	60	" "	3000	43,8
Зигбан	"	120	Каменная соль	1000	23,1
"	"	120	" "	2000	21,9
"	"	120	" "	3000	19,9
"	"	120	Известков. шпат	1000	24,9
"	"	120	" "	2000	23,8
"	"	120	" "	3000	21,9
Зееман	Метод лезвия и камеры со щелью	280	Каменная соль	500	19,9

Спектр ограф	Метод	Расстояние кристалличе- ской пластин- ки в м.м	Кристалл	Участок длин волн в X	Расстоянию в 1 м.м на пластинке или пленке соответств. разн. длин волн в X
Зееман	Метод лезвия и камеры со щелью	280	Каменная соль	1000	19,1
"	"	280	Известков. шпат	500	21,4
"	"	280	" "	10 X	20,7
"	"	280	Гипс	1000	53,7
"	"	280	"	2000	52,6
"	"	420	Каменная соль	500	13,3
"	"	420	Известков. шпат	500	14,3
"	"	420	Гипс	1000	35,8
"	"	420	"	200	35,1
"	"	490	Каменная соль	500	11,4
"	"	490	Известков. шпат	500	12,2
"	"	490	Гипс	1000	30,7
"	"	490	"	2000	30,1

Таблица 18а

Постоянные решеток  $d$  некоторых кристаллов при 18° С по Зигсану

Кристалл	Плоскость	$d \cdot 10^8$	Интенсивность линий первых четырех порядков по Бреггу
Каменная соль	Плоск. спайности	2,81400	100 : 20 : 7 : 3
Известковый шпат	" "	3,02904	100 : 20 : 20 : 9
Гипс	" "	7,578	—
Слюда	" "	9,927	—
Пальмитиновая кислота	" "	35,49	—
Кварц	Плоск. призмы	4,247	—
Сахар	100	10,57	(Стенстрём)
$K_4FeCN_6$	100	8,408	—
Карборунд	111	2,49	(Овен)

Угол отражения и длина волны по Зигбану при  $n = 1$ 

Длина волны в $X$ $X = 10^{-3} \text{ \AA}$	Угол отражения для		
	каменной соли	известкового шпата	гипса
200	2°2'	1°53'	—
400	4°4'	3°47'	1°31'
600	6°7'	5°41'	—
800	8°10'	7°35'	—
1000	10°14'	9°30'	3°47'
1200	12°19'	11°25'	—
1400	14°24'	13°22'	5°18'
1600	16°31'	15°19'	—
1800	18°39'	17°17'	6°49'
2000	20°49'	19°16'	—
2200	23°1'	21°18'	8°21'
2400	25°14'	23°20'	—
2600	27°31'	25°25'	9°53'
2800	29°50'	27°31'	—
3000	32°13'	29°41'	10°25'
3200	34°39'	31°53'	—
3400	37°10'	34°8'	12°58'
3600	39°46'	36°28'	—
3800	42°28'	38°51'	14°31'
4000	45°18'	41°19'	—
4200	48°16'	43°53'	16°5'
4400	51°25'	46°35'	—
4600	54°49'	49°24'	17°40'
4800	58°31'	52°24'	—
5000	62°41'	55°37'	19°16'



## § 4. Рентгенметры

Все современные приборы для энергетических измерений в области рентгеновских лучей построены на принципе ионизационного действия лучей в воздухе.

Рентгенметром называется прибор, предназначенный для измерений физической дозы в рентгенах или мощности физической дозы в  $r/sec$  ( $r/min$ ).

Любой рентгенметр состоит из следующих частей:

1) камеры, в которой происходит ионизация воздуха под действием измеряемого рентгеновского излучения;

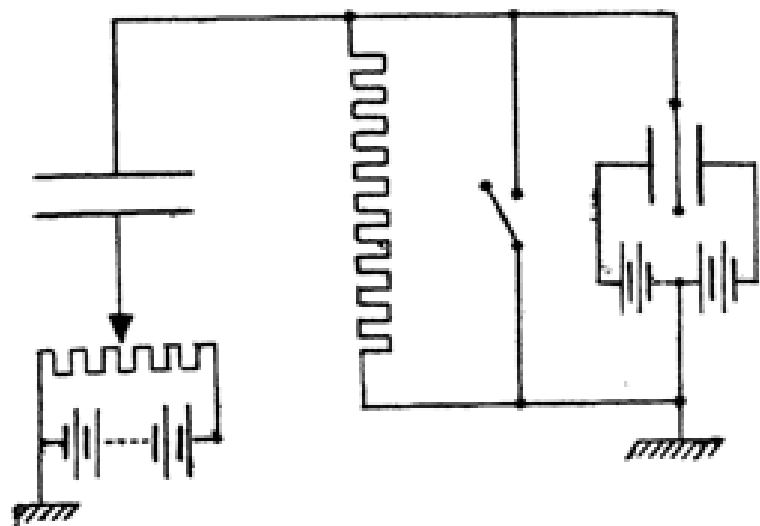


Рис. 11-а.

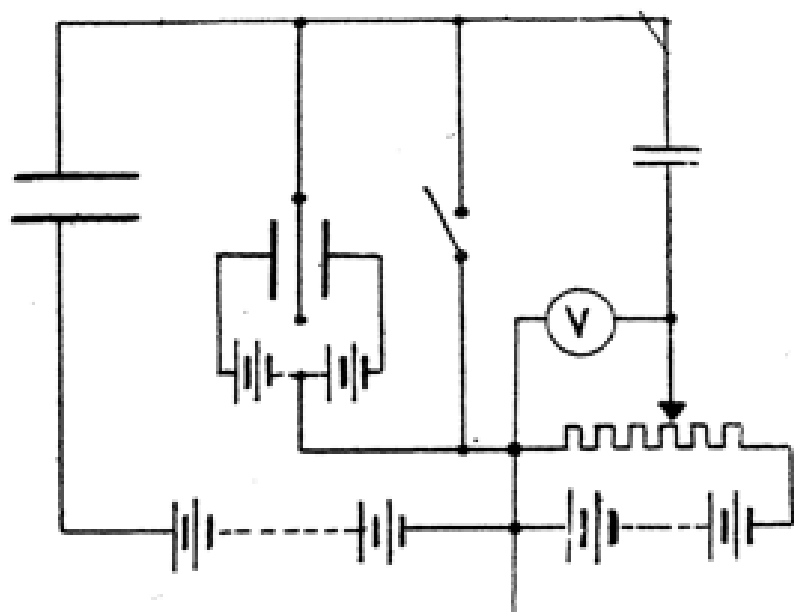


Рис. 11-б.

Рис. 11. Принципиальные схемы электрометрического измерения силы ионизационного тока: а) по Бронсону, б) по Таусенду.



Рис. 12. Ионизационный прибор по Вульффу.

2) соединительной части, связывающей камеру с электрическим устройством;

3) электрометрического устройства для измерения силы ионизационного тока или количества электричества.

Кроме того, в некоторых конструкциях применяются:

4) специальные приспособления (сигнальные и счетные).

С помощью рентгенметра выполняются следующие основные измерительные проблемы:

а) анализ качества смешанного излучения путем измерения слоя половинного ослабления;

б) измерение мощности физической дозы в воздухе, на поверхности и на глубине освещаемого тела;

в) определение количества энергии рентгеновских лучей, фактически поглощенных освещаемым телом;

г) измерение физической дозы в воздухе за некоторый интервал времени;

д) снятие кривых распределения мощности физической дозы в воздухе.

Основными методами измерения силы ионизационного тока являются:

1) гальванометрический и 2) электрометрический: а) метод заряда или разряда конденсатора, б) метод Бронсона, в) компенсационный метод Таунсенда.

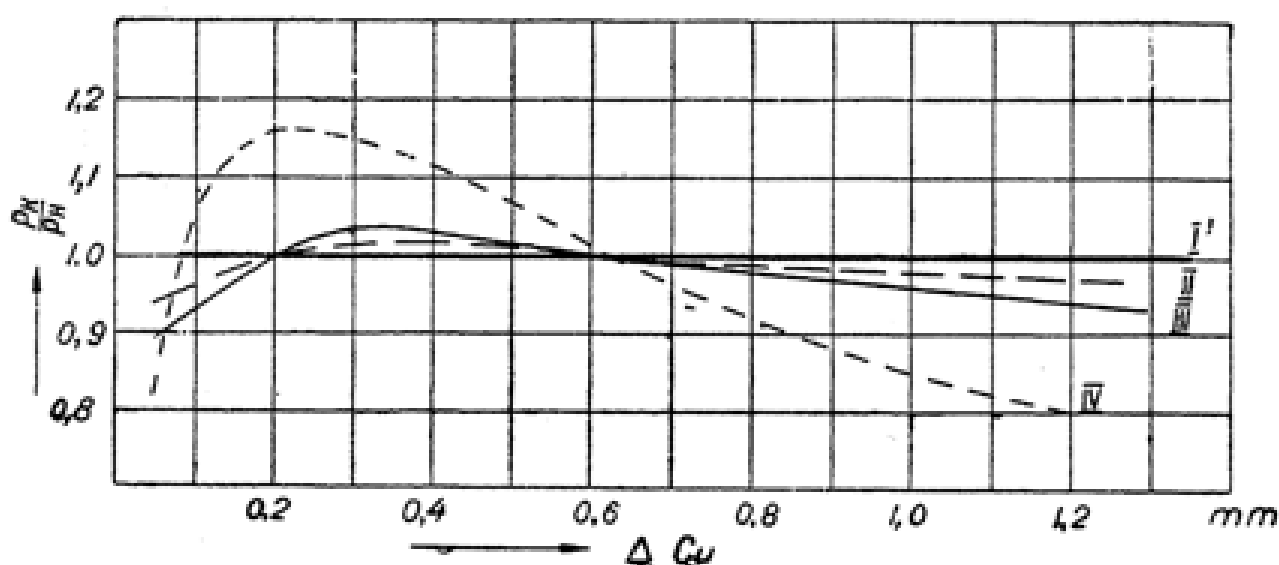


Рис. 13. Ход изменения относительных показаний приборов, снабженных различными камерами,<sup>а</sup> в зависимости от качества излучения:

I — цилиндрическая камера, II — бакелитовая наперстковая камера, III — графитовая камера (с примесью Si), IV — алюминиевая камера со стенками толщиной 0,18 мм. При  $\Delta Cu = 0,6$  мм показания приборов для всех камер приняты равными единице.

Ионометры (по Мартусу, Спизяру, Фридриху, Винаверу, Заксу, Соломону, Вульфу и т. п.).

Камера наперстковая из алюминия или эбонита или графита с кремнием.

Внешний проводящий слой заземлен. Внутренний электрод соединен с электрометром.

Заряд подается на электрод от электростатической машинки.

Метод измерений — наблюдение за указателем электрометра при потере заряда электродом.

Пределы измерений без специальных приспособлений приблизительно от 30  $r/min$  до  $5 \cdot 10^{-2} r/min$ .

Светосигнальный рентгенметр ВНИИМа отличается от предыдущих типов тем, что снабжен автоматическим зарядным устройством с питанием от сети

переменного тока и специальной конструкцией электрометра, позволяющей наблюдение светового сигнала.

Измерительный прибор по Кюстнеру (имеет несколько модификаций). Принцип действия тот же, что и у предыдущих приборов.

Большая модель снабжена основной цилиндрической камерой для лабораторных измерений и набором специальных камер для практических целей.

Прибор снабжен радиоактивным контрольным ионизатором, прост и надежен в употреблении. При употреблении цилиндрической камеры с диафрагмами охватывает широкий диапазон измерений от  $50 \text{ r/min}$  до  $10^{-4} \text{ r/min}$  и практически вовсе свободен от изменений постоянной в зависимости от качества излучения в интервале от  $\Delta_{Ac} = 0,15 \text{ мм}$  до  $\Delta_{Ca} = 2,0 \text{ мм}$ .

Наблюдение за нитью электрометра производится с помощью отсчетного микроскопа.

Прочие модели имеют тот же принцип действия и отличаются лишь конструктивным оформлением.

Малая модель имеет малые габаритные размеры и вес (10 кг). Прибор для точных измерений отличается отсчетным и зарядным устройствами. Новая модель — зарядным и электрометрическим устройством.

На том же принципе, что и прибор Кюстнера, работает прибор разработанный Г. Р. И. (Москва).

Особенностью конструкции является добавление камеры для рассеянного излучения и добавочного конденсатора, приключаемого при измерениях больших физических доз.

Универсальный измерительный прибор по Раевскому имеет аналогичный принцип действия как и ионометры. Особенностью является зарядное приспособление, выполненное путем выпрямления переменного напряжения.

Наблюдение за нитью электрометра производится по тени на матовой шкале. Камера выполнена в виде плоского конденсатора в заземленном кожухе. Для расширения пределов измерений прибор снабжен добавочным конденсатором.

Интегральный рентгенметр Сименса имеет тот же принцип действия. Особенность конструкции: шаровая камера, коленчатая соединительная часть и добавочные конденсаторы. Электрометр стрелочный.

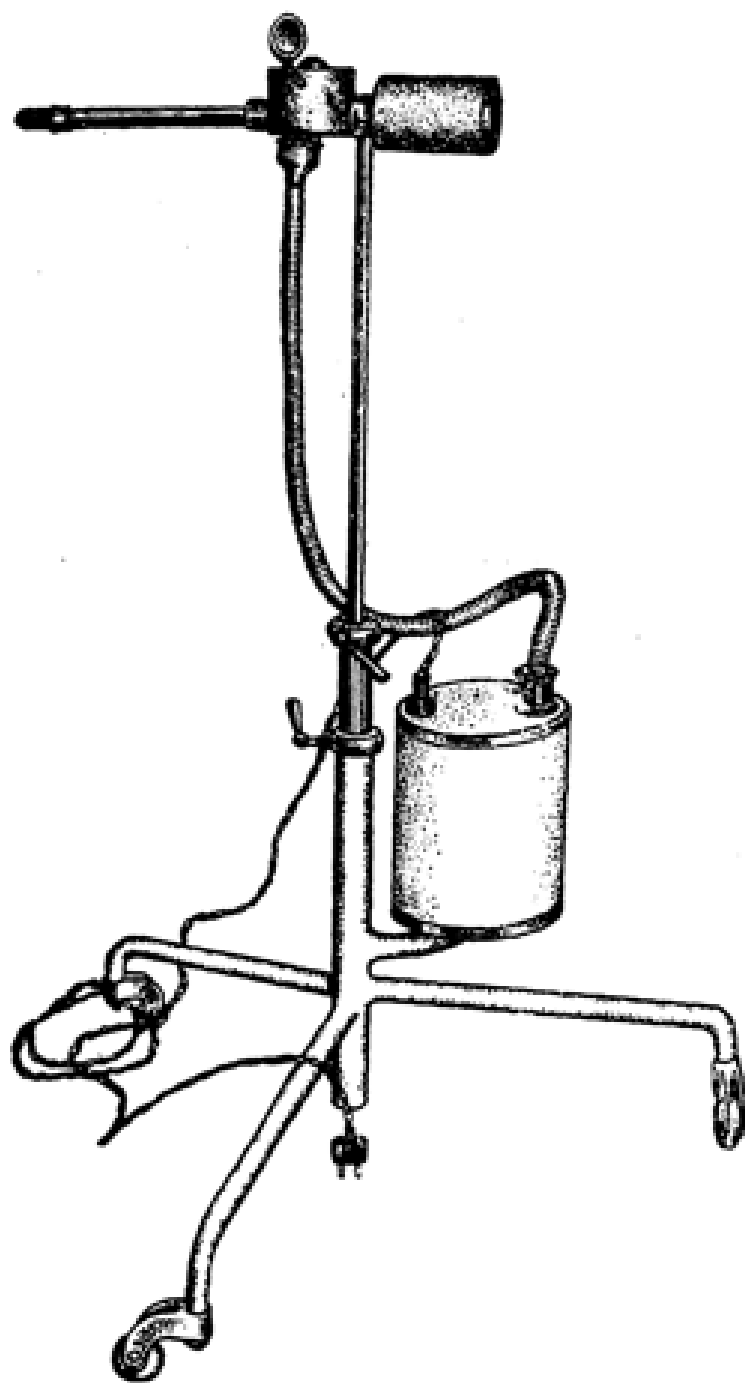


Рис. 14. Общий вид светосигнального рентгенметра (завод „Буревестник“).

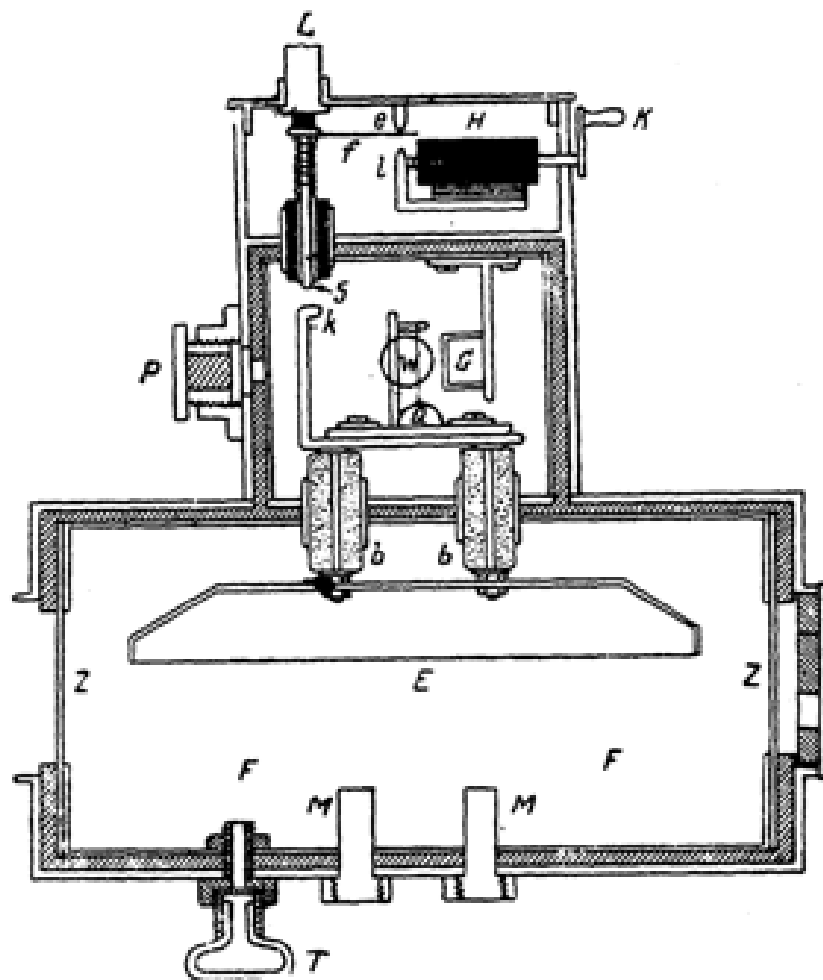


Рис. 15. Схематический разрез большого измерительного устройства по Кюстнеру.

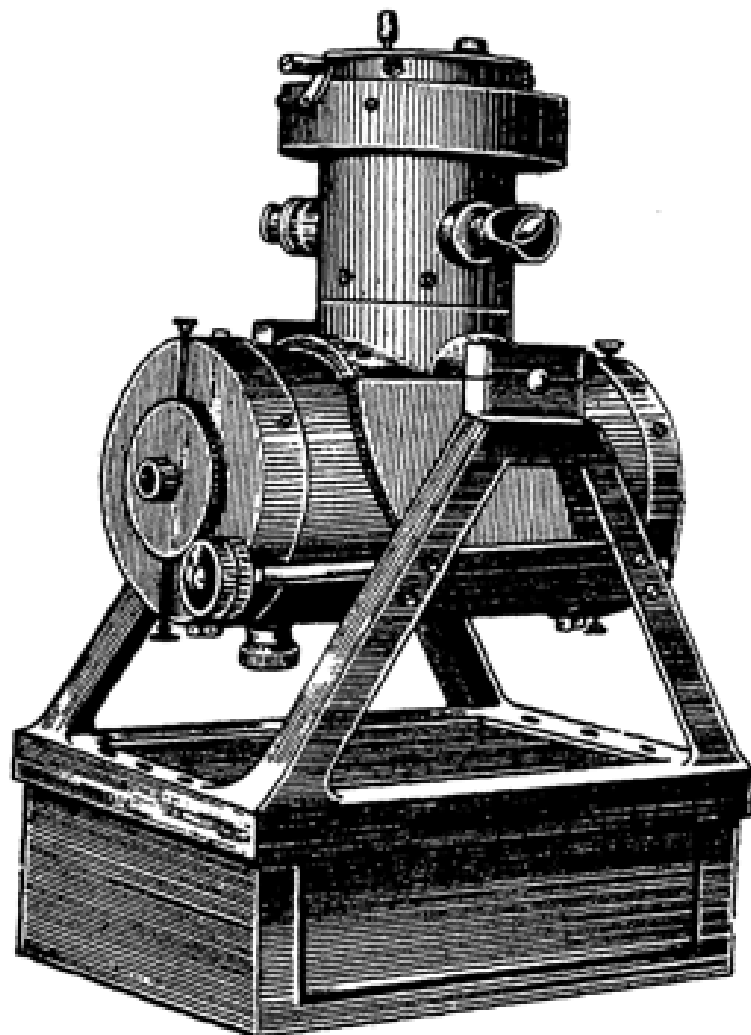


Рис. 16. Общий вид большого измерительного устройства по Кюстнеру.

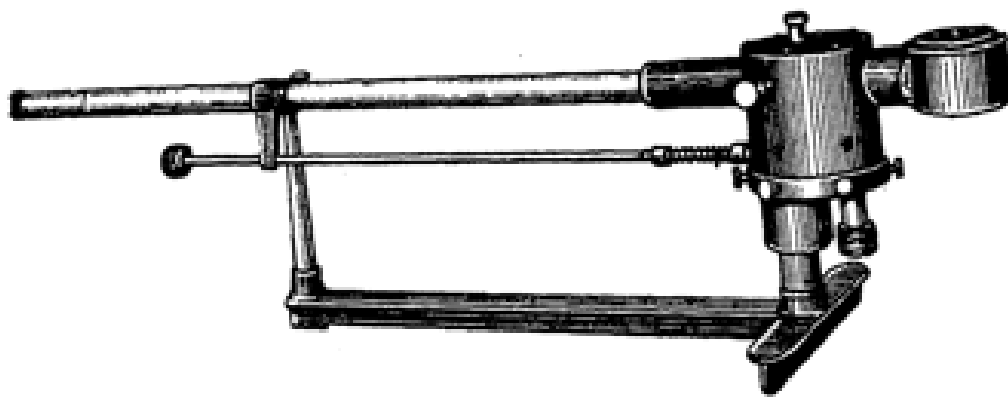


Рис. 17. Специальный прибор по Кюстнеру для точных измерений.

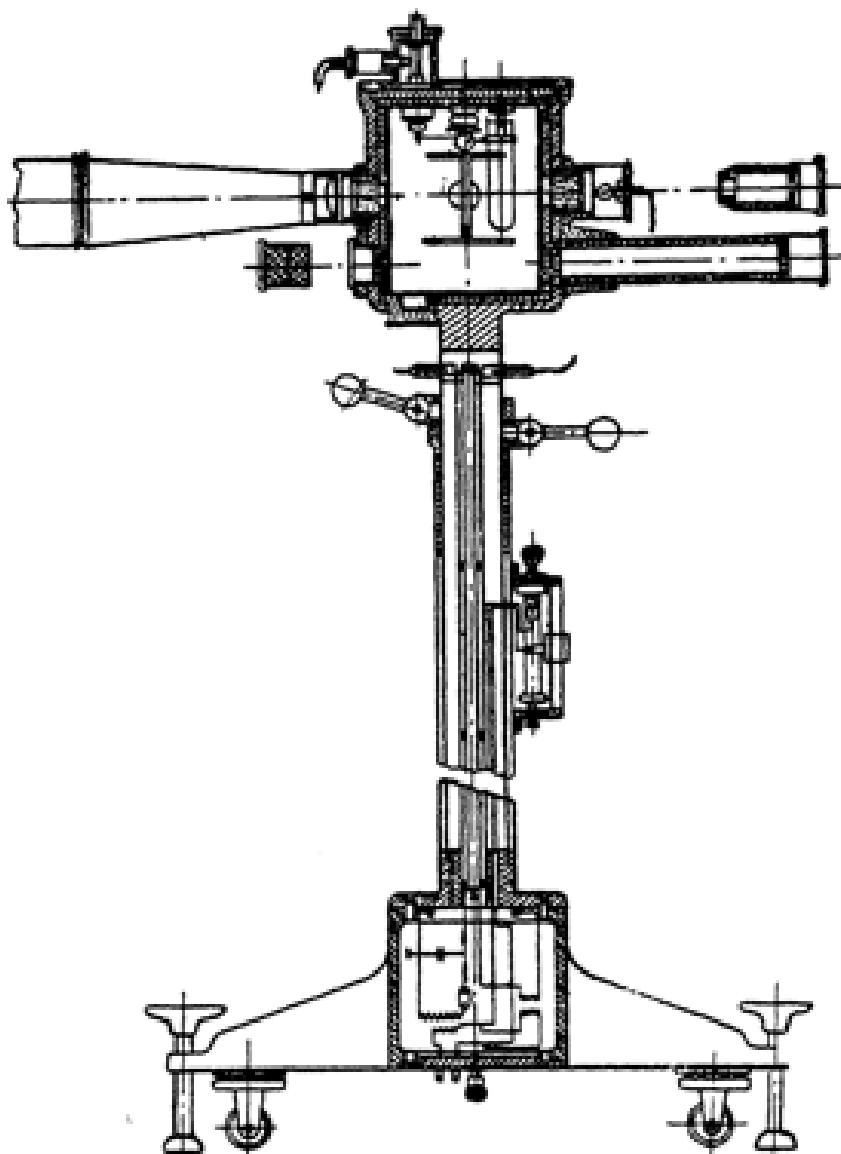


Рис. 18. Устройство универсального рентгенметра по Ржевскому.

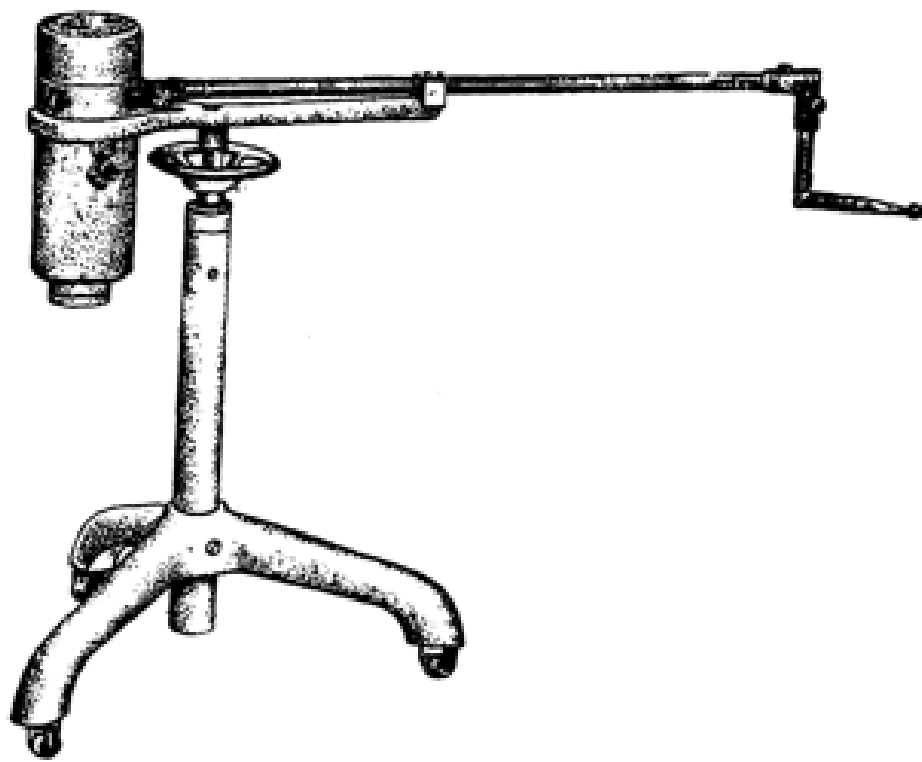


Рис. 19. Общий вид интегрального рентгенметра  
Сименса.

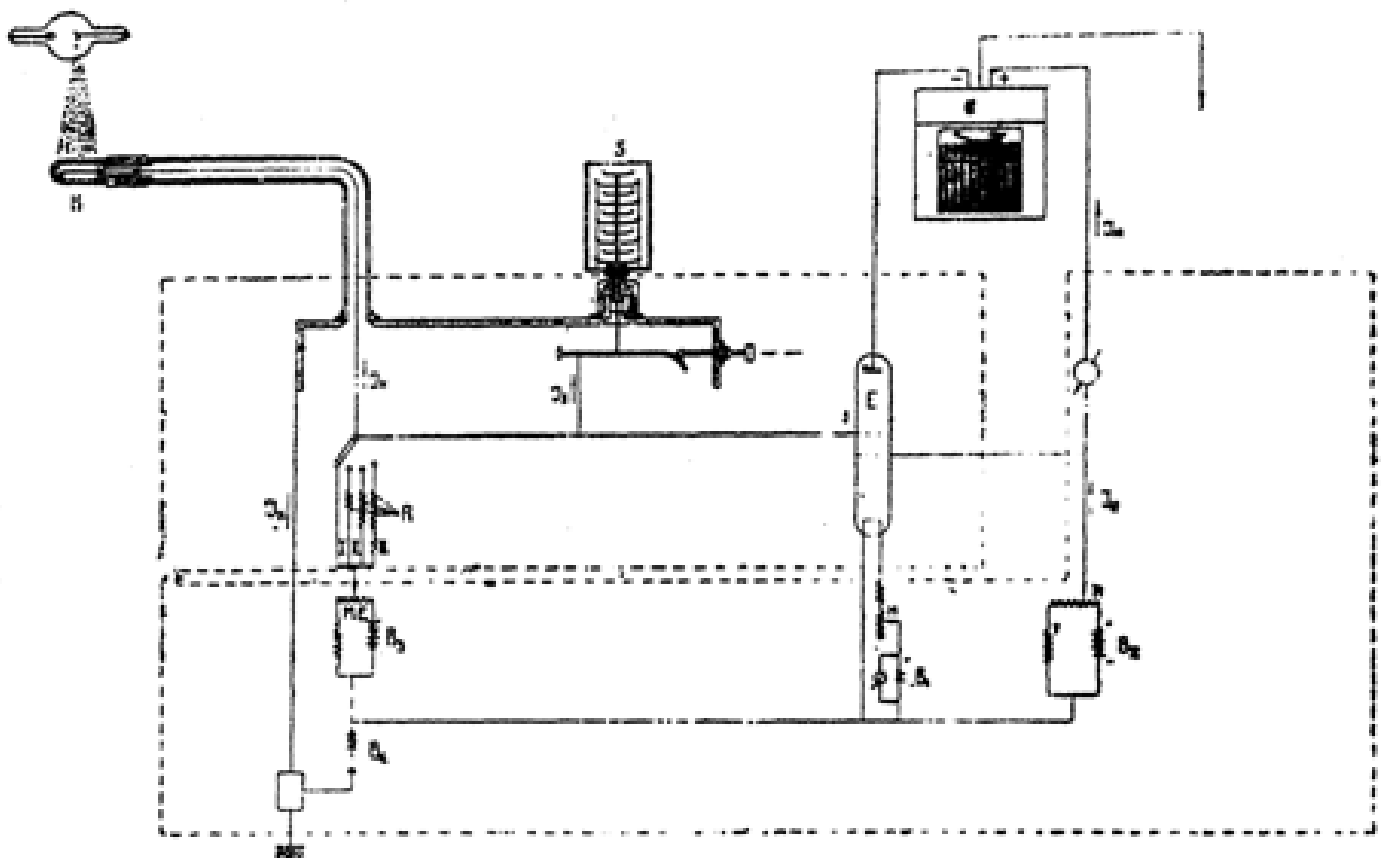


Рис. 20. Принципиальная схема действия рентгенметра  
Сименса (дозиметра).

Рентгенметр Сименса (Dosismesser),

Принцип действия показан на рис. 20.

Измерение ионизационного тока производится по схеме Бронсона, в которой электромметр заменен двухстворчатой усилительной лампой с высокой изоляцией управляющей сетки. Питание прибора производится от аккумуляторных батарей. Соединительная часть выполнена в виде гибкого шланга высокой изоляции. Нормально прибор снабжается наперстковой камерой. Возможно применение регистрирующего устройства.

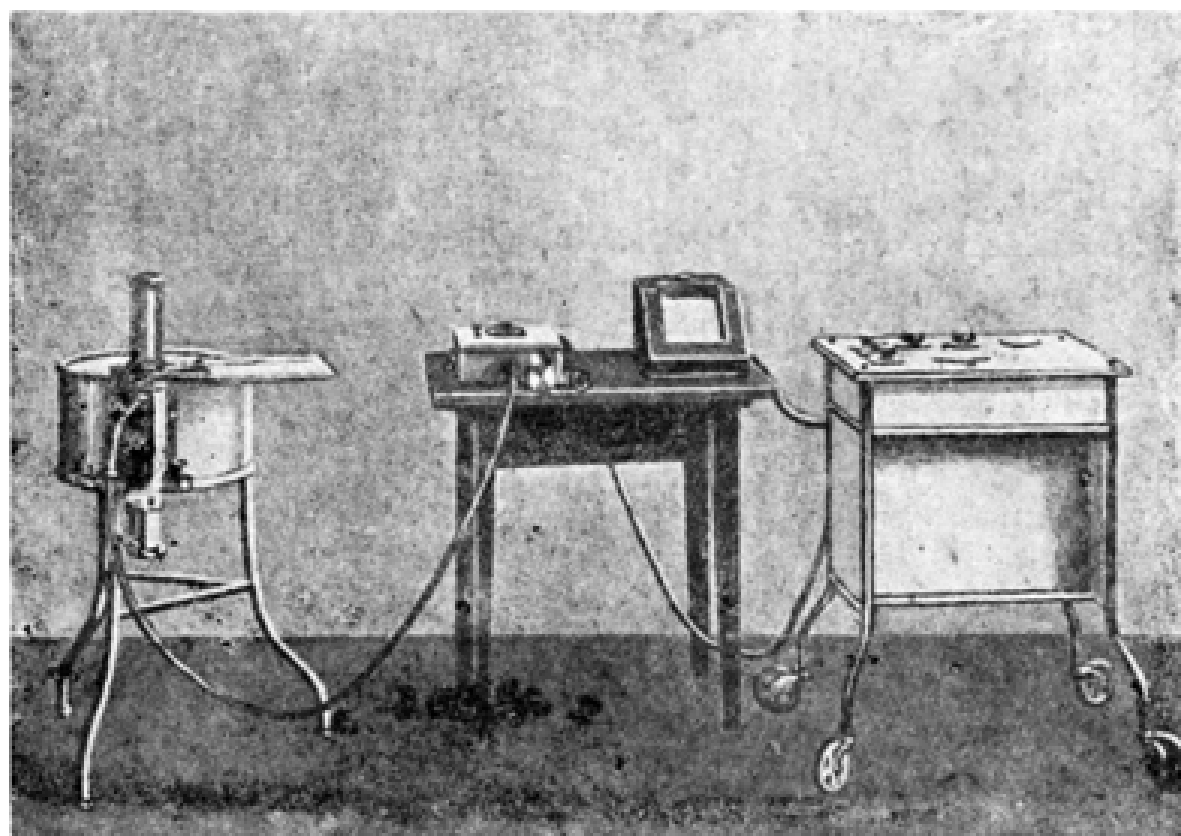


Рис. 21. Общий вид рентгенметра Сименса (дозисмессера).

Рентгенметр по Гаммеру.

Схема действия прибора показана на рис. 22.

Питание прибора производится от сети переменного тока. Проводящий графитовый слой 2 в бакелитовой камере *A* поддерживается при потенциале 1200 вольт от выпрямительного устройства *D*.

Всякий раз, когда при ионизации воздуха камеры лучами измерительная система 3—8—9 заряжается до потенциала 600 вольт, подвижное заземленное крыло 11—12 притягивается к электродам 9 и замыкает контакт 13. При действии реле 14 и 15 происходит работа сигнальных и счетных механизмов *C*, а также заземление измерительного электрода 16—9.

На том же принципе работает модель прибора Ионогном.

Чувствительность прибора 5г на этап действия.

Рентгенметр по Штраусу (Мекарлон).

На проводящий слой камеры *D* (из карболита) рис. 14 подается потенциал 90 V от выпрямительного устройства (на схеме показана батарея). Измерительный электрод  $L_1$  соединен с сеткой *G* триода, в анодной цепи которого включена обмотка чувствительного электромагнитного реле  $R_1$ .

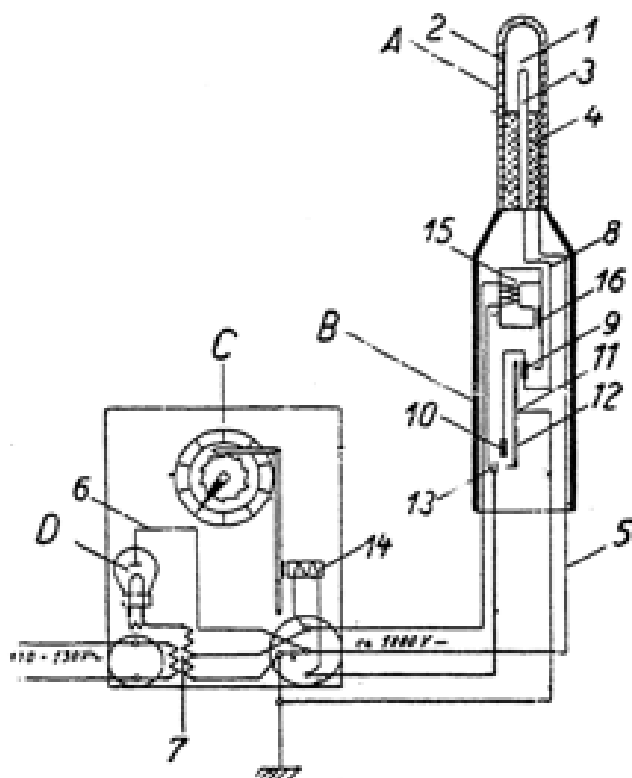


Рис. 22. Принципиальная схема действия рентгенметра Гаммера.

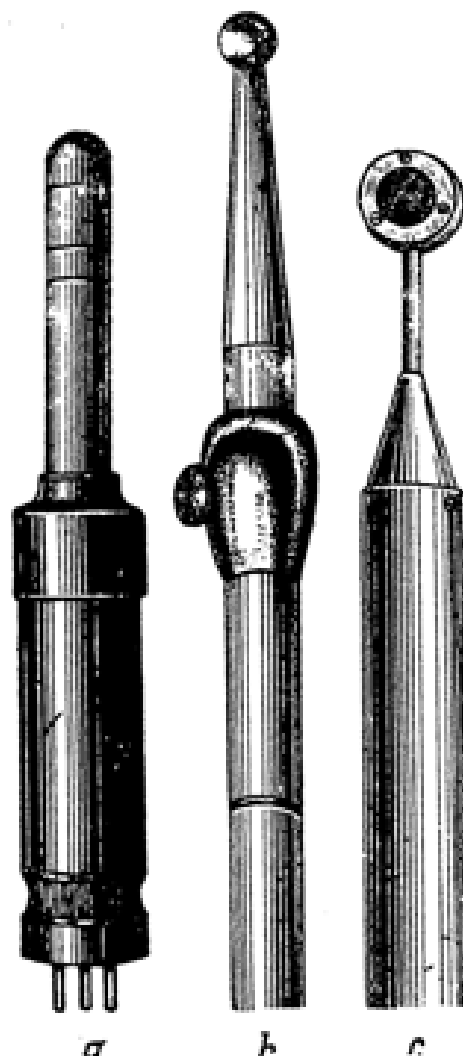


Рис. 23. Камеры рентгенметров: а) матрица, содержащая реле и камера рентгенметра Гаммера, б) шаровая камера интегрального рентгенметра Сименса, в) специальная камера для мягких рентгеновских лучей рентгенметра Штрауса (Меканнон).

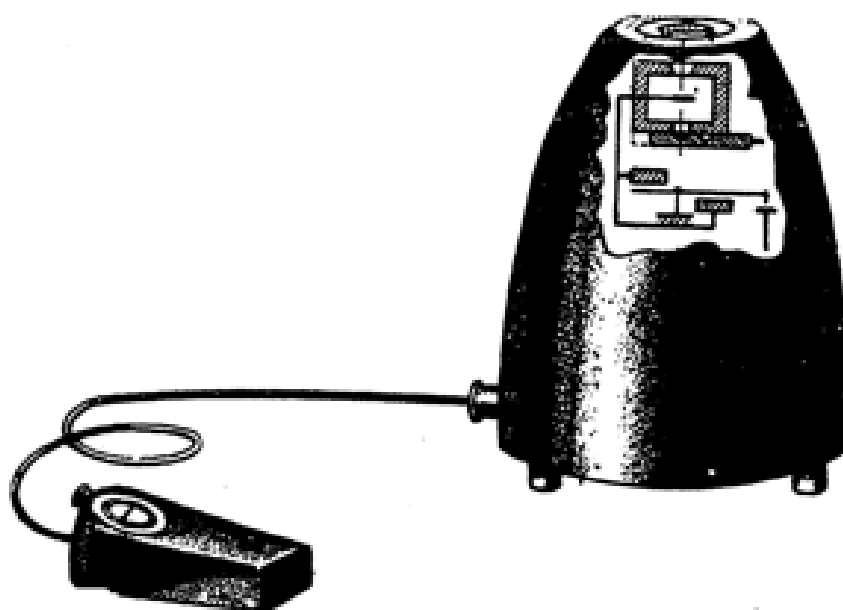


Рис. 24. Общий вид упрощенной модели рентгенметра Гаммера (Ионотном).



Измерительный электрод, а следовательно и сетка лампы, при действии реле по индукции заряжается до  $-150\text{ V}$ , так что сетка полностью экранирует анод, и ток в анодной цепи отсутствует.

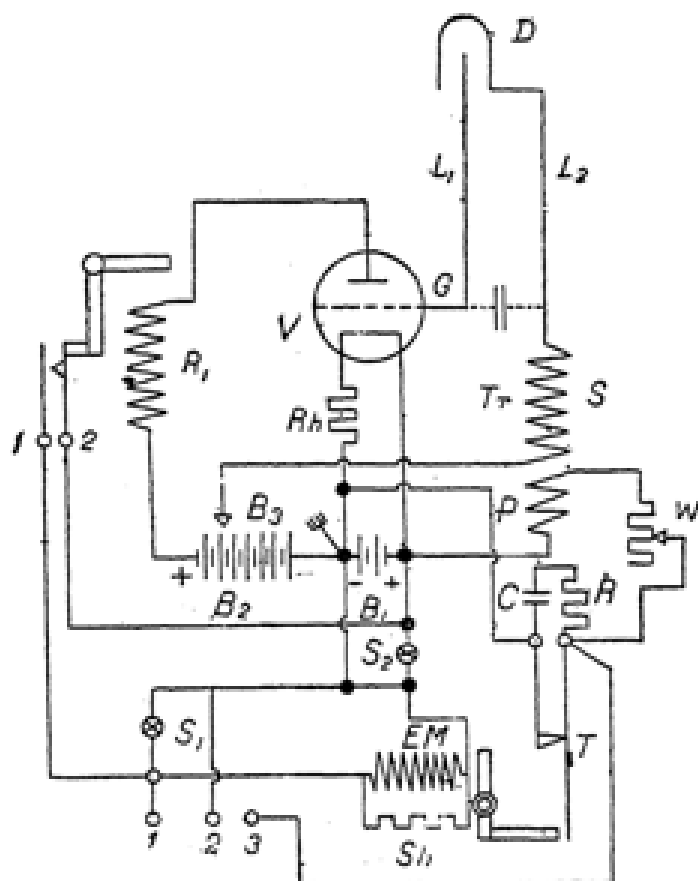


Рис. 25. Принципиальная схема действия рентгенметра Штрауса (Мекаплон).

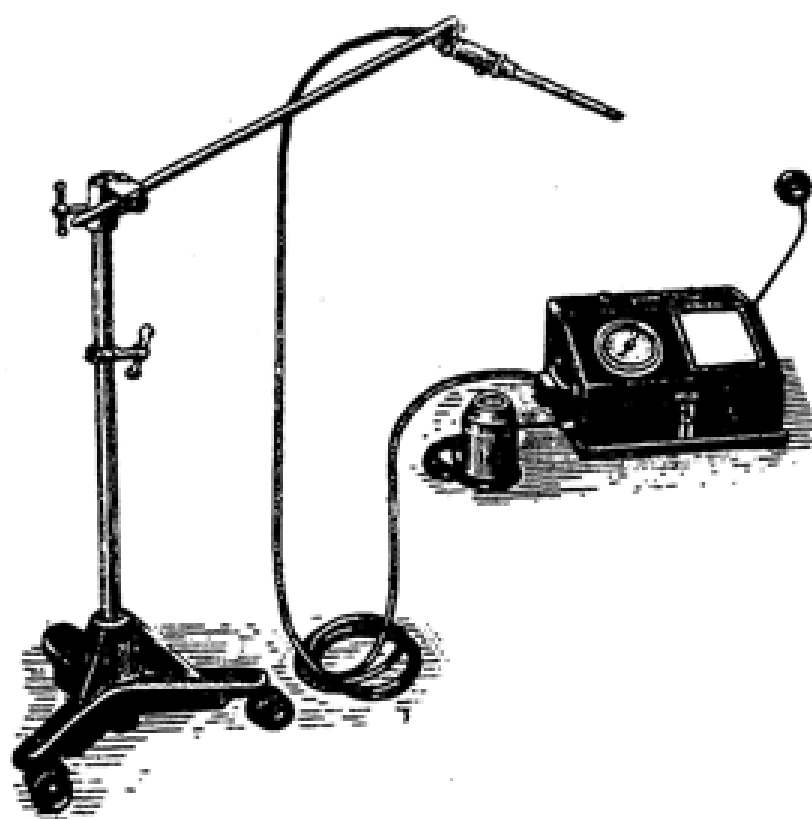


Рис. 26. Общий вид рентгенметра Штрауса (новая модель Мекаплон).

При ионизации воздуха камеры лучами, потенциал сетки возрастает и при — 90 вольт ток в анодной цепи достигает значения 1 мА, достаточного для действия основного реле. Контрольный ионизатор выполнен в виде уравновешенного ионизатора.

Новые модели прибора снабжены питанием от сети переменного тока. Прибор снабжен набором камер для различных измерительных целей.

Моментан-рентгенметр Сименса.

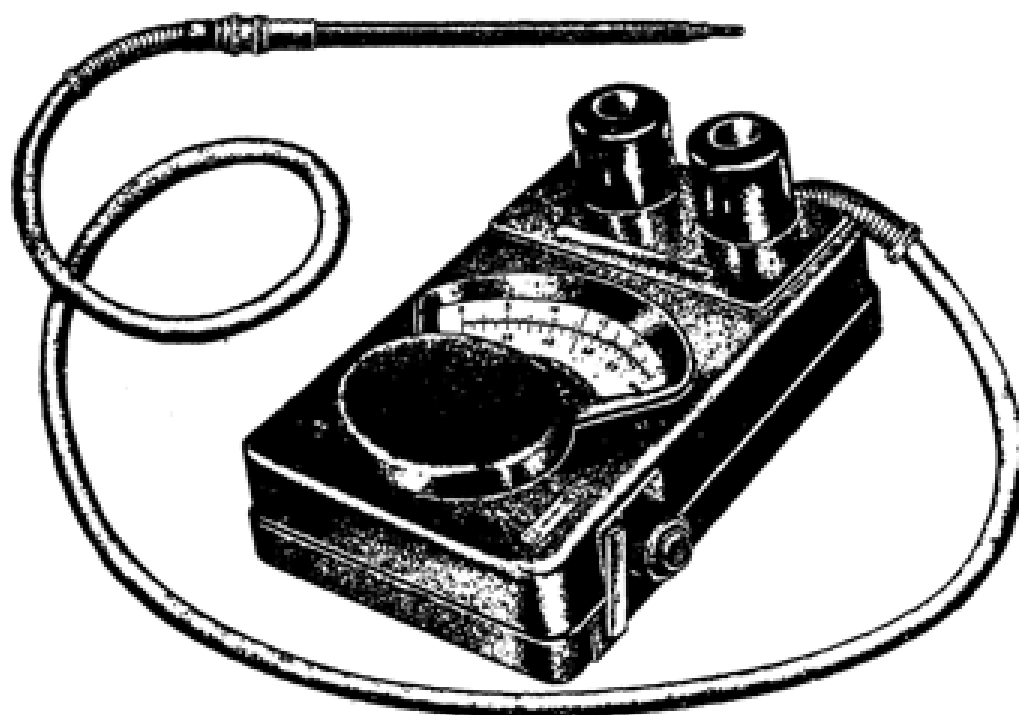


Рис. 27. Общий вид „Моментан-рентгенметра“ Сименса.

Прибор работает непосредственно по схеме Бронсона. Снабжен квадрантным электрометром на подвесе специальной конструкции и приспособлением с синхронным хронометром для наблюдения за величиной поданной дозы.

#### ЛИТЕРАТУРНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Физические константы, 1930.

С. Э. Т., т. I и IV, 1929.

А. П. Афанасьев. Таблицы математ. и физических величин, 1933 г.

А. Ф. Вальтер, Физика диэлектриков, 1933.

В. А. Витка. Рентгеновские аппараты, 1931.

И. В. Поройков. Физические основы дозиметрии, 1934 г.

M. Siegbahn. Spektroskopie der Röntgenstrahlen, 1931.

H. Holthusen. Grundlagen und Praxis Dosierung, 1933

Zeitschrift für technische Physik.

Fortschritte a. d. Gebiete der Röntgenstrahlen.

British Journal of Radiology.

Elektrotechnische Zeitschrift.

Elektrotechnik und Maschinenbau.

Достижения в области рентгенотехники.

ОТДЕЛ III

**ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ  
В РЕНТГЕНОМЕТРИИ (СТАНДАРТЫ)**

# О В Ш Е С О Ю З Н Ы Й С Т А Н Д А Р Т

ОСТ  
ВКС  
6350

Основные понятия, термины и обозначения в области рентгеновских лучей

Т е р м и н ы	Обозначения	О п р е д е л е н и я	Размерности
Частота колебаний	$\nu$ $\nu_0$	Число колебаний в секунду Пределная наибольшая частота колебаний в непрерывном спектре рентгеновских лучей	$[T^{-1}]$ $[T^{-1}]$
Уровни энергии атома	$K, L_I, L_{II}, L_{III} \dots$ $M_I, M_{II} \dots$	Уровни энергии атома, определяющие излучение и поглощение рентгеновских лучей атомом — обозначения по Зингбану	—
Серия $K$ , серия $L$ , серия $M$ , серия $N$	$K, L, M, N$ $K_{\alpha_1}, K_{\alpha_2}, \dots, K_{\beta_1}, \dots$ $L_{\alpha_1}, \dots, L_{\beta_1}, \dots$	Серия характеристического спектра рентгеновских лучей Отдельные линии характеристического спектра рентгеновских лучей — обозначения по Зингбану	
Длина волны	$\lambda$	Длина волны рентгеновских лучей в пустоте: $\lambda = \frac{c}{\nu},$ где $c$ — скорость распространения электромагнитных колебаний в пустоте Пределная наименьшая длина волны в непрерывном спектре рентгеновских лучей в пустоте Длина волны, соответствующая границе полосы поглощения рентгеновских лучей Длины волн отдельных линий характеристического спектра рентгеновских лучей серий $K, L, \dots$	$[L]$ $[L]$ $[L]$ $[L]$

Энергия излучения	$W$	Энергия рентгеновских лучей, проходящих через данную поверхность за данное время	$[L^2MT^{-2}]$
	$W_0$	Энергия рентгеновских лучей, падающих на данную поверхность освещаемой среды	$[L^2MT^{-2}]$
	$W_a$	Энергия рентгеновских лучей, поглощенная освещаемой средой	$[L^2MT^{-2}]$
	$W_\lambda$	Энергия рентгеновских лучей длины волны $\lambda$	$[L^2MT^{-2}]$
Мощность излучения	$P$	Энергия рентгеновских лучей, отнесенная к единице времени	$[L^2MT^{-3}]$
		$P = \frac{dW}{dt},$	
	$P_0$	где $dt$ — элемент времени	$[L^2MT^{-3}]$
	$P_a$	Мощность рентгеновских лучей, падающих на поверхность освещаемой среды	$[L^2MT^{-3}]$
	$P_\lambda$	Мощность рентгеновских лучей. поглощенная освещаемой средой	$[L^2MT^{-3}]$
		Мощность рентгеновских лучей длины волны $\lambda$	
Интенсивность излучения	$I$	Мощность рентгеновских лучей, отнесенная к единице поверхности:	$[MT^{-3}]$
		$I = \frac{dP}{ds},$	
	$I_0$	где $ds$ — элемент поверхности	$[MT^{-3}]$
	$I_\lambda$	Интенсивность рентгеновских лучей на поверхности освещаемой среды	$[MT^{-3}]$
		Интенсивность рентгеновских лучей длины волны $\lambda$	
Плотность интенсивности в спектре	$Y_\lambda$	Отношение мощности рентгеновских лучей длины волны $\lambda$ к объему:	$[L^{-1}MT^{-3}]$
		$Y_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{dP}{dV},$	
		где $d\lambda$ — элемент длины волны, $dV$ — элемент объема	

Т е р м и н ы	Обозначения	О п р е д е л е н и я	Размерность
	$\lambda_{\text{max}}$	Длина волны, соответствующая максимальной плотности интенсивности в непрерывном спектре рентгеновских лучей	[L]
Эффективная (эквивалентная) длина волны	$\lambda_{\text{eff}}$	Длина волны однородного пучка рентгеновских лучей, интенсивность которого ослабляется некоторым слоем освещаемой среды во столько же раз, как и интенсивность данного смешанного пучка лучей	[L]
Коэффициент ослабления	$\mu$	Коэффициент в формуле: $I = I_0 e^{-\mu x},$ где $x$ — толщина ослабляющего слоя	[L <sup>-1</sup> ]
	$\tau$	Часть коэффициента ослабления, обусловленная фотоэффектом	[L <sup>-1</sup> ]
	$\sigma$	Часть коэффициента ослабления, определяемая из соотношения:	[L <sup>-1</sup> ]
	$\sigma_T$	Часть коэффициента, определяющая энергию электронов отдачи	[L <sup>-1</sup> ]
	$\sigma_s$	Коэффициент, определяемый из соотношения: $\sigma_s = \sigma - \sigma_T$	[L <sup>-1</sup> ]
		Примечание. Для массовых коэффициентов допустятся обозначения: $\frac{\mu}{\rho}, \frac{\tau}{\rho}, \frac{\sigma}{\rho}, \frac{\sigma_T}{\rho}, \frac{\sigma_s}{\rho},$ где $\rho$ — плотность вещества	
Скачок ослабления	$\delta_\mu$	Отношение коэффициентов ослабления до и после границы поглощения уровня	—
	$\delta_\tau$	Отношение значений величин $\tau$ до и после границы поглощения уровня	—

Доза (физическая)	$D$	Поглощенная энергия рентгеновских лучей, отнесенная к единице объема освещаемой среды: $D = \frac{dW_a}{dV},$ где $dV$ — элемент объема	$[L^{-1}MT^{-2}]$
	$D_0$	Физическая доза рентгеновских лучей на поверхности освещаемой среды	$[L^{-1}MT^{-2}]$
Мощность физической дозы	$P_D$	Физическая доза рентгеновских лучей, отнесенная к единице времени: $P = \frac{dD}{dt},$ где $dt$ — элемент времени	$[L^{-1}MT^{-3}]$
	$P_{D_0}$	Мощность физической дозы рентгеновских лучей на поверхности освещаемой среды	$[L^{-1}MT^{-3}]$
Слой половинного ослабления	$\Delta$	Примечание. В случаях, не возбуждающих сомнений, индексы $D$ у обозначений $P_D$ и $P_{D_0}$ опускаются	[L]
Угол дифракционного отклонения	$\theta$	Толщина слоя освещаемой среды, ослабляющая интенсивность рентгеновских лучей в два раза	—
Порядок дифракционного отражения	$n$	Примечание. Обозначение $\Delta$ сопровождается подстрочным индексом, указывающим ослабляющее вещество	—
Угол дифракционного отражения $n$ -го порядка	$\theta_n$	Угол, составленный направлением отраженных рентгеновских лучей с сетчатой плоскостью кристалла	—
		Порядковый номер дифракционного максимума при отражении рентгеновских лучей	—
		Угол дифракционного отражения рентгеновских лучей $n$ -го дифракционного максимума	—

При одновременном рассмотрении нескольких одноименных величин соответствующим образом обозначения, указанные в настоящем стандарте, сопровождаются подстрочными индексами 1, 2, 3...

## Единицы рентгеновского излучения

Наименование	Сокращенные обозначения	Определения	Отношение к основной единице	Размерность
<p>Единица физической дозы излучения</p> <p>1. Рентген</p>	г	<p>Физическая доза рентгеновских лучей, при которой, в результате полного ионизационного действия в воздухе при 0° С и нормальном атмосферном давлении,<sup>1</sup> образуются заряды каждый в одну электростатическую единицу на один куб. сантиметр освещаемого объема.</p> <p>Справка Вторым международным конгрессом радиологов в 1928 г. в Стокгольме определение этой же единицы „рентген“ принято в следующей редакции</p> <p>„Международная единица рентгеновского излучения представляет собой количество рентгеновских лучей, которое в ионизационной камере в кубическом сантиметре атмосферного воздуха, находящегося при 0° С и под давлением ртутного столба в 760 мм высотой, при полном использовании вторичных электронов и при устранении действия стенки, создает такую проводимость, что измеренный при токе насыщения заряд равен одной электростатической единице“</p> <p>Примечание. Под полной ионизацией понимается полное использование лучистой энергии для ионизации</p>	1	$L^{-1}MT^{-2}$

<sup>1</sup> По ОСТ 5859.



Наименование	Сокращенные обозначения	Определения	Отношение к основной единице	Размерность
2. Миллирентген	мг	Одна тысячная рентгена (0,001 г)	$10^{-3}$	$L^{-1}MT^{-2}$
3. Микрорентген	μг	Одна миллионная рентгена (0,000001 г)	$10^{-6}$	
<b>Единица энергии излучения</b>				
4. Рентген-кубический сантиметр	г·см <sup>3</sup>	Энергия рентгеновских лучей, которая, будучи поглощена в одном кубическом сантиметре, создает в любом элементе этого объема физическую дозу, равную одному рентгену	1	$L^2MT^{-2}$
5. Миллирентген-кубический сантиметр	мг × × см <sup>3</sup>	Одна тысячная рентген-кубического сантиметра (0,001 г·см <sup>3</sup> )	$10^{-3}$	
6. Микрорентген-кубический сантиметр	μг см <sup>3</sup>	Одна миллионная рентген-куб. см. (0,000001 г·см <sup>3</sup> )	$10^{-6}$	
<b>Единица интенсивности излучения</b>				
7. Рентген-сантиметр в секунду	$\frac{\text{г·см}}{\text{сек}}$	Интенсивность рентгеновских лучей, при которой через один квадратный сантиметр поверхности нормально к ней в одну секунду проходит равномерно распределенная энергия излучения в один рентген-кубический сантиметр	1	
8. Миллирентген-сантиметр в секунду	$\frac{\text{мг·см}}{\text{сек}}$	Одна тысячная рентген-сантиметра в секунду $\left(0,001 \frac{\text{г·см}}{\text{сек}}\right)$	$10^{-3}$	
9. Микрорентген-сантиметр в секунду	$\frac{\mu\text{г·см}}{\text{сек}}$	Одна миллионная рентген-сантиметра в секунду $\left(0,000001 \frac{\text{г·см}}{\text{сек}}\right)$	$10^{-6}$	

Наименование	Сокращенные обозначения	Определения	Отношение к основной единице	Размерность
Единица мощности физической дозы, равно как и единица плотности интенсивности в спектре				
10. Рентген в секунду	$\frac{\text{г}}{\text{век}}$	Мощность физической дозы рентгеновских лучей, при которой в течение одной секунды физическая доза равномерно нарастает на один рентген	1	$L^{-1}MT^{-2}$
11. Миллирентген в секунду	$\frac{\text{мг}}{\text{век}}$	Одна тысячная рентгена в секунду $\left(0,001 \frac{\text{г}}{\text{век}}\right)$	$10^{-3}$	—
12. Микрорентген в секунду	$\frac{\text{мкг}}{\text{век}}$	Одна миллионная рентгена в секунду $\left(0,000001 \frac{\text{г}}{\text{век}}\right)$	$10^{-6}$	—

Условия вещественного осуществления единицы рентген устанавливаются Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии (ВНИИМ).

Механический эквивалент рентгеновского излучения  $1 \text{ ч} = 0,11 \pm 0,01 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$

Рентгенометрия  
Термины и определения

№ п/п	Термины	Определения
1	Характеристический спектр	Спектр рентгеновского излучения, возникающего в результате перехода электронов в атоме с одного уровня энергии на другой и состоящего из колебаний нескольких различных частот
2	Непрерывный спектр	Спектр рентгеновского излучения, возникающего в результате торможения катодного пучка в какой-либо среде и состоящего из колебаний непрерывного ряда различных частот
3	Однородное излучение	Излучение, в состав которого входят рентгеновские лучи, длины волн которых лежат в произвольно выбранном узком интервале $\Delta\lambda$
4	Граничная длина волны	Наименьшая длина волны в непрерывном спектре рентгеновских лучей
5	Длина волны максимальной интенсивности в непрерывном спектре	Длина волны, соответствующая наибольшей плотности интенсивности в непрерывном спектре
6	Коротковолновый участок спектра	Часть непрерывного спектра, примыкающая к граничной длине волны
7	Участок наибольшей интенсивности спектра	Часть непрерывного спектра, примыкающая к длине волны максимальной интенсивности
8	Длинноволновый участок спектра	Часть непрерывного спектра, содержащая длины волн большие, чем длина волны максимальной интенсивности
9	Первичное излучение	Рентгеновское излучение, возникающее при попадании катодного пучка на вещество
10	Вторичное излучение	Рентгеновское излучение, возникающее в результате воздействия первичного излучения

№ п/п	Термины	Определения
11	Напряжение генерирования	Напряжение на электродах рентгеновской трубки во время генерирования рентгеновских лучей
12	Анодный ток	Ток, протекающий через анод рентгеновской трубки
13	Потенциал возбуждения атома	Наименьшее напряжение генерирования, при котором происходит возбуждение ряда линий характеристического спектра рентгеновских лучей
14	Ионная рентгеновская трубка	Вакуумный прибор для генерирования рентгеновских лучей, катодный пучок в котором образуется вследствие наличия газовых ионов
15	Электронная рентгеновская трубка	Вакуумный прибор для генерирования рентгеновских лучей, катодный пучок в котором образуется вследствие эмиссии электронов горячим катодом
16	Фокусное пятно (фокус)	Часть поверхности анода, которая является местом преимущественного попадания катодного пучка и преимущественного выхода первичных рентгеновских лучей
17	Зеркало анода	Поверхность среза анода, содержащая фокус рентгеновской трубки
18	Афокальное излучение	Рентгеновское излучение, возникающее вне фокусного пятна
19	Поглощение энергии рентгеновского излучения	Преобразование энергии падающих рентгеновских лучей в энергию другого вида при распространении их через какую-либо среду
20	Рассеяние энергии рентгеновского излучения	Преобразование энергии падающих рентгеновских лучей в энергию рентгеновских же лучей, но распространяющихся в различных направлениях
21	Ослабление рентгеновского излучения	Уменьшение мощности рентгеновских лучей при распространении через какую-либо среду, вследствие поглощения и рассеяния
22	Линейный коэффициент поглощения	Отношение поглощенной при фотоэффекте элементарным слоем среды энергии рентгеновских лучей к падающей, рассчитанное на единицу длины

№ п/п	Термины	Определения
23	Линейный коэффициент рассеяния	Отношение рассеянной элементарным слоем среды энергии рентгеновских лучей к падающей, рассчитанное на единицу длины
24	Линейный коэффициент ослабления	Сумма линейных коэффициентов поглощения и рассеяния
25	Массовые коэффициенты поглощения, рассеяния, ослабления	Отношение линейных коэффициентов к плотности освещаемой среды
26	Ионизационное действие	Образование ионов, обусловленное освещением рентгеновскими лучами
27	Химическое действие	Протекание химической реакции, обусловленное освещением рентгеновскими лучами
28	Световозбуждающее действие	Свечение флуоресцирующего вещества, обусловленное освещением рентгеновскими лучами
29	Тепловое действие	Нагревание, обусловленное освещением рентгеновскими лучами
30	Жесткость рентгеновских лучей (проникающая способность).	Большая или меньшая проникающая способность (относительная) данного излучения, по сравнению с другим рентгеновским же излучением, при распространении через какую-либо среду
31	Степень неоднородности излучения	Ширина спектрального интервала рентгеновских лучей, определяемая числом октав колебаний, практически присутствующих в непрерывном спектре
32	Фильтрация излучения	Уменьшение степени неоднородности излучения при распространении рентгеновских лучей через какую-либо среду
33	Эквивалент по ослаблению	Толщина слоя какой-либо среды, которая ослабляет рентгеновское излучение во столько же раз, как и данный слой другой среды. Например, медный эквивалент 2 мм алюминия по ослаблению
34	Эквивалент по однородности	Толщина слоя ослабляющей среды, которая отфильтровывает спектр из столько же октав, как и данный слой другой среды

№ п/п	Термины	Определения
35	Рабочий пучок	Пучок рентгеновских лучей, направленных в освещаемую среду
36	Окно трубки	Часть трубки, служащая для выпуска рабочего пучка
37	Диафрагма	Приспособление, предназначенное для ограничения поперечного сечения рабочего пучка
38	Осевой луч	Луч, являющийся осью симметрии рабочего пучка
39	Центральный луч	Луч, перпендикулярный к направлению: „середина катода — центр фокуса“ — и лежащий в плоскости, содержащей ось трубки и нормаль к поверхности зеркала анода
40	Фокусное расстояние	Расстояние от середины фокуса рентгеновской трубки до рассматриваемой точки
41	Поле освещения	Площадь поперечного сечения рабочего пучка в месте его проникновения в освещаемую среду
42	Ионизационный объем	Объем газа, в котором фактически происходит образование ионов
43	Измерительный ионизационный объем	Объем газа, пронизываемый рентгеновскими лучами, к которому относят измеряемый ионизационный эффект
44	Процентная глубинная доза	Помноженное на 100 отношение физической дозы на глубине к дозе на поверхности в месте прохождения осевого луча
45	Изодоза	Кривая на плоскости, соединяющая точки, в которых значение мощности физической дозы рентгеновских лучей одинаково
46	Изодозная поверхность	Поверхность, во всех точках которой значение мощности физической дозы одинаково
47	Индикатор рентгеновских лучей	Прибор, предназначенный для обнаружения действия рентгеновских лучей
48	Дозиметр	Всякий прибор, предназначенный для измерения дозы или мощности дозы рентгеновских лучей

№ п/п	Термины	Определения
49	Рентгенметр	Прибор для измерения физической дозы в рентгенах или мощности физической дозы в рентгенах в секунду
50	Камера рентгенметра (дозиметра)	Часть рентгенметра (дозиметра), подвергаемая воздействию рентгеновских лучей, в которой происходит преобразование их энергии, измеряемое каким-либо методом
51	Контрольный ионизатор	Часть прибора, содержащая препарат радиоактивного элемента, предназначенный для контроля над сохранением постоянной рентгенметра
52	Фантом	Искусственное сооружение, заменяющее освещаемый объект и предназначенное для измерения физической дозы на глубине
53	Условно-безвредная доза	Физическая доза рентгеновских лучей в воздухе, при которой не проявляется вредное действие их на организм, подвергнутой освещению этими лучами
54	Защитное устройство	Устройство, предназначенное для защиты от вредного действия рентгеновских лучей
55	Свинцовый эквивалент образца	Выраженная в миллиметрах толщина свинца, ослабляющая мощность физической дозы в воздухе в той же мере, как и данный образец защитного устройства
56	Свинцовый коэффициент образца	Выраженное в процентах отношение свинцового эквивалента к толщине материала
57	Защитный материал	Материал, предназначенный для изготовления защитных устройств, свинцовый эквивалент которого определен согласно нормам и правилам защиты
58	Самозащитная рентгеновская трубка	Рентгеновская трубка, излучение которой при максимальном напряжении, допускаемом трубкой, ослаблено в любом расстоянии от трубки, в пределах ее габарита, так же, как рабочий пучок ослаблен в тех же расстояниях от оси трубки слоем свинца толщиной, соответствующей нормам защиты

ОТДЕЛ IV

**РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ**



## § 1. Рентгеновские спектры

Физически строгое определение границ спектра рентгеновского излучения указать затруднительно. Наиболее важный в практическом отношении участок заключен в интервале от  $\lambda = 0,05 \text{ \AA}$  до  $\lambda = 2 \text{ \AA}$ .

Между длиной волны  $\lambda$ , частотой колебаний  $\nu$  и скоростью света в пустоте  $c$  имеет место соотношение

$$\nu \cdot \lambda = c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек.}}$$

Величина кванта энергии  $\epsilon$  связана с потенциалом возбуждения  $U$  соотношением Планка

$$\epsilon = h\nu = eU,$$

где  $e$  — заряд электрона.

Отсюда  $\lambda = \frac{12,34}{U}$  для  $\lambda$  в  $\text{ \AA}$  и  $U$  в  $\text{kV}$  (Дуан-Хэнт).

Таблица 20

Длина волн, потенциалы возбуждения, частоты и кванты энергии рентгеновских лучей

(для сравнения в конце таблицы приведены кванты энергии лучей длин волн охватывающих видимый спектр)

$\lambda$ $\text{ \AA}$	$U$ $\text{kV}$	$\nu$ $\text{Hz}$	$\epsilon$ эрги	$\epsilon$ электрон- вольты
0,03	410	$1,00 \cdot 10^{20}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$	$4,12 \cdot 10^3$
0,04	308	$7,50 \cdot 10^{19}$	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$3,08 \cdot 10^3$
0,05	247	$6,00 \cdot 10^{19}$	$3,92 \cdot 10^{-7}$	$2,46 \cdot 10^3$
0,06	206	$5,00 \cdot 10^{19}$	$3,27 \cdot 10^{-7}$	$2,05 \cdot 10^3$
0,07	177	$4,30 \cdot 10^{19}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^3$
0,08	154	$3,75 \cdot 10^{19}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^3$
0,09	137	$3,33 \cdot 10^{19}$	$2,18 \cdot 10^{-7}$	$1,37 \cdot 10^3$
0,10	123	$3,00 \cdot 10^{19}$	$1,96 \cdot 10^{-7}$	$1,26 \cdot 10^3$
0,11	112	$2,72 \cdot 10^{19}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^3$
0,12	103	$2,50 \cdot 10^{19}$	$1,63 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^3$
0,13	95,0	$2,30 \cdot 10^{19}$	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$9,55 \cdot 10^2$
0,14	88,2	$2,14 \cdot 10^{19}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$8,88 \cdot 10^2$

$\lambda$ Å	$U$ kV	$\nu$ Hz	$\varepsilon$ Эрги	$\varepsilon$ электрон- вольты
0,15	82,3	$2,00 \cdot 10^{19}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$8,24 \cdot 10^4$
0,16	77,1	$1,87 \cdot 10^{19}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$7,79 \cdot 10^4$
0,17	72,7	$1,76 \cdot 10^{19}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	$7,25 \cdot 10^4$
0,18	68,5	$1,66 \cdot 10^{19}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	$6,80 \cdot 10^4$
0,19	65,0	$1,58 \cdot 10^{19}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^4$
0,20	61,7	$1,50 \cdot 10^{19}$	$9,30 \cdot 10^{-8}$	$5,84 \cdot 10^4$
0,22	56,1	$1,36 \cdot 10^{19}$	$8,90 \cdot 10^{-8}$	$5,59 \cdot 10^4$
0,24	51,5	$1,25 \cdot 10^{19}$	$8,15 \cdot 10^{-8}$	$5,12 \cdot 10^4$
0,26	47,5	$1,15 \cdot 10^{19}$	$7,51 \cdot 10^{-8}$	$4,72 \cdot 10^4$
0,28	44,0	$1,07 \cdot 10^{19}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$	$4,40 \cdot 10^4$
0,30	41,2	$1,00 \cdot 10^{19}$	$6,55 \cdot 10^{-8}$	$4,11 \cdot 10^4$
0,32	38,6	$9,40 \cdot 10^{18}$	$6,14 \cdot 10^{-8}$	$3,85 \cdot 10^4$
0,34	36,3	$8,81 \cdot 10^{18}$	$5,76 \cdot 10^{-8}$	$3,62 \cdot 10^4$
0,36	34,4	$8,34 \cdot 10^{18}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$3,42 \cdot 10^4$
0,38	32,4	$7,90 \cdot 10^{18}$	$5,16 \cdot 10^{-8}$	$3,25 \cdot 10^4$
0,40	30,8	$7,50 \cdot 10^{18}$	$4,90 \cdot 10^{-8}$	$3,08 \cdot 10^4$
0,45	27,4	$6,67 \cdot 10^{18}$	$4,35 \cdot 10^{-8}$	$2,74 \cdot 10^4$
0,50	24,7	$6,00 \cdot 10^{18}$	$3,92 \cdot 10^{-8}$	$2,46 \cdot 10^4$
0,55	22,4	$5,45 \cdot 10^{18}$	$3,56 \cdot 10^{-8}$	$2,24 \cdot 10^4$
0,60	20,6	$5,00 \cdot 10^{18}$	$3,26 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^4$
0,70	17,6	$4,30 \cdot 10^{18}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^4$
0,80	15,4	$3,75 \cdot 10^{18}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,54 \cdot 10^4$
0,90	13,7	$3,34 \cdot 10^{18}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^4$
1,0	12,4	$3,00 \cdot 10^{18}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$	$1,23 \cdot 10^4$
1,2	10,3	$2,50 \cdot 10^{18}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^4$
1,4	8,80	$2,14 \cdot 10^{18}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$8,80 \cdot 10^3$
1,6	7,70	$1,88 \cdot 10^{18}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$7,75 \cdot 10^3$
1,8	6,86	$1,67 \cdot 10^{18}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$	$6,90 \cdot 10^3$
2,0	6,17	$1,50 \cdot 10^{18}$	$9,80 \cdot 10^{-9}$	$6,15 \cdot 10^3$
2,5	4,95	$1,20 \cdot 10^{18}$	$7,84 \cdot 10^{-9}$	$4,92 \cdot 10^3$
3,0	4,10	$1,00 \cdot 10^{18}$	$6,55 \cdot 10^{-9}$	$4,12 \cdot 10^3$
3,5	3,53	$8,56 \cdot 10^{17}$	$5,60 \cdot 10^{-9}$	$3,52 \cdot 10^3$
4,0	3,04	$7,5 \cdot 10^{17}$	$4,90 \cdot 10^{-9}$	$3,08 \cdot 10^3$
$\left\{ \begin{array}{l} 3\ 000\ \text{Å} \\ 6\ 000\ \text{Å} \\ 10\ 000\ \text{Å} \end{array} \right.$	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,55 \cdot 10^{-12}$	— 4,12 —
	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{14}$	$3,27 \cdot 10^{-12}$	— 2,05 —
	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{14}$	$1,96 \cdot 10^{-12}$	— 1,23 —

Непрерывным спектром рентгеновских лучей называется спектр, возникающий в результате торможения электронов катодного пучка в любой среде и состоящий из непрерывного ряда частот колебаний.

Граничная длина волны определяется соотношением Дуан-Хэнга

$$\lambda_0 = \frac{12,34}{U_{\max}}$$

Таблица 20-а

$\lambda$ в Å	$U_{\max}$ в kV	$\lambda$ в Å	$U_{\max}$ в kV	$\lambda$ в Å	$U_{\max}$ в kV	$\lambda$ в Å	$U_{\max}$ в kV
0,01	1235	0,26	47,5	0,51	24,2	0,80	15,4
0,02	618	0,27	45,7	0,52	23,8	0,85	14,5
0,03	412	0,28	44,1	0,53	23,3	0,90	13,7
0,04	309	0,29	42,6	0,54	22,9	0,95	13,0
0,05	247	0,30	41,2	0,55	22,5	1,00	12,4
0,06	206	0,31	39,8	0,56	22,1	1,05	11,8
0,07	176	0,32	38,6	0,57	21,7	1,10	11,2
0,08	154	0,33	37,4	0,58	21,2	1,15	10,7
0,09	137	0,34	36,3	0,59	20,9	1,20	10,3
0,10	124	0,35	35,3	0,60	20,6	1,25	9,9
0,11	112	0,36	34,4	0,61	20,2	1,30	9,5
0,12	103	0,37	33,4	0,62	19,9	1,35	9,1
0,13	95	0,38	32,5	0,63	19,6	1,40	8,8
0,14	88	0,39	31,7	0,64	19,3	1,45	8,5
0,15	82	0,40	30,9	0,65	19,0	1,50	8,2
0,16	77	0,41	30,1	0,66	18,7	1,55	7,9
0,17	73	0,42	29,4	0,67	18,4	1,60	7,7
0,18	69	0,43	28,7	0,68	18,2	1,65	7,5
0,19	65	0,44	28,1	0,69	17,9	1,70	7,3
0,20	62	0,45	27,4	0,70	17,6	1,75	7,1
0,21	59	0,46	26,8	0,71	17,4	1,80	6,9
0,22	56	0,47	26,3	0,72	17,2	1,85	6,7
0,23	54	0,48	25,7	0,73	16,9	1,90	6,5
0,24	52	0,49	25,2	0,74	16,7	1,95	6,3
0,25	49	0,50	24,7	0,75	16,5	2,00	6,2

Функция, определяющая распределение интенсивности по спектру или плотность интенсивности в спектре

$$Y_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda},$$

где  $I$  — интенсивность лучей или количество лучистой энергии, отнесенное к единице поверхности и единице времени.

По Куленкампу, для постоянного напряжения и массивного анода

$$Y_{\lambda} = A \cdot J \cdot [Z(\nu_0 - \nu) + aZ^2],$$

где  $Z$  — атомный номер элемента анода,

$J$  — сила анодного тока, в трубке,

$A$  и  $a$  — постоянные, зависящие от выбора единиц.

Так как

$$Y_{\nu} d\nu = - Y_{\lambda} d\lambda$$

$$dv = - \frac{c}{\lambda^2} d\lambda,$$

$$Y_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} Y_\nu.$$

Пренебрегая членом  $aZ^2$  в виду его малости, допустимо считать

$$\begin{aligned} Y_\lambda &= \frac{A \cdot c^2}{12,84} \cdot J \cdot Z \cdot \frac{1}{\lambda^2} (U_0 - U_\lambda) = A_1 \cdot J \cdot Z \cdot \frac{c^2}{\lambda_0} \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^3} = \\ &= k \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^3}. \end{aligned}$$

Таким образом, плотность интенсивности в спектре, отвечающая какой-либо длине волны, прямо пропорциональна силе анодного тока  $J$ , атомному номеру элемента  $Z$  и напряжению генерирования  $U_0$ .

Для построения кривых распределения интенсивности по спектру при различных напряжениях последнему выражению удобно придать иной вид, положив

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\lambda_0} &= m; \\ Y_\lambda &= k_1 \cdot U^3 \cdot \frac{m - 1}{m^3}. \end{aligned}$$

Таблица 21

Значения  $\varphi(m) = \frac{m-1}{m^3}$  для различных  $m = \frac{\lambda}{\lambda_0}$  от 1 до 10

$m$	$\varphi m$	$m$	$\varphi m$
1	0	2,5	0,096
1,1	0,075	3,0	0,074
1,2	0,116	3,5	0,058
1,3	0,137	4,0	0,047
1,4	0,146	4,5	0,038
1,5	0,148	5,0	0,032
1,6	0,147	6,0	0,023
1,7	0,142	7,0	0,018
1,8	0,137	8,0	0,014
1,9	0,131	9,0	0,011
2,0	0,125	10,0	0,009

Вид кривых показан на рис. 28.

Максимальная плотность интенсивности в спектре приходится на длину волны  $\lambda_{\max} \approx 1,5\lambda_0$ , что вытекает из условия экстремума функции  $Y_\lambda$ .

$$\left( \frac{dY_\lambda}{d\lambda} = 0 \right).$$

Интенсивность смешанного излучения (всего спектра) прямо пропорциональна квадрату напряжения генерирования:

$$I = \int_{\lambda_0}^{\infty} Y_{\lambda} d\lambda = C \cdot J \cdot Z \cdot U^2.$$

Коэффициент полезного действия генератора рентгеновских лучей (трубки) прямо пропорционален атомному номеру элемента анода  $Z$  и напряжению генерирования  $U$ :

$$\eta = \frac{P_A}{P_s} = C \cdot Z \cdot U,$$

где  $C \approx 10^{-6}$  при  $U$ , выраженном в киловольтах.

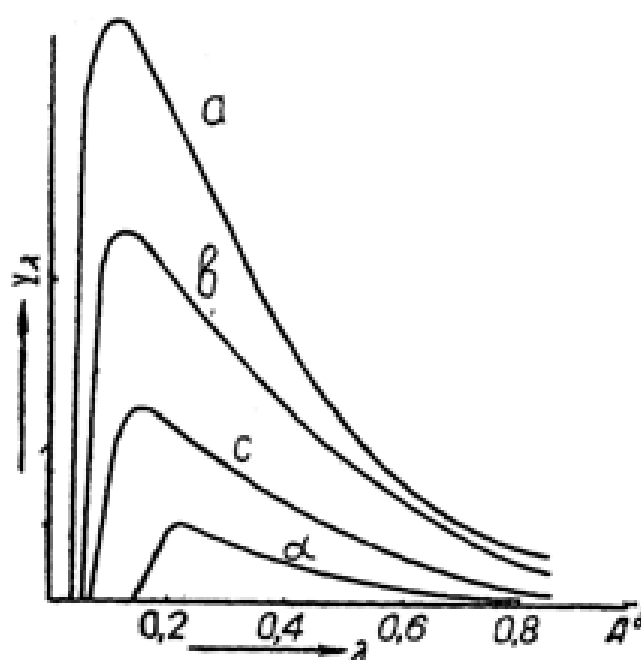


Рис. 28. Распределение плотности интенсивности в непрерывном спектре рентгеновских лучей для постоянного напряжения: а) 300 kV, б) 275 kV, в) 150 kV, г) 75 kV.

Если напряжение не остается постоянным, то для построения кривой распределения плотности интенсивности по действующему спектру необходимо знать формы кривых напряжения генерирования и анодного тока.

При пульсации напряжения пульсирует также и спектр излучения, так что для действующего значения плотности интенсивности имеем:

$$Y_{\lambda} = \frac{1}{T} \int_{\tau} Y_{\lambda}(t) dt,$$

где  $T$  — период пульсации и  $\tau$  время генерирования (в частях периода) излучения длины волны  $\lambda$  или частоты  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

Отсюда

$$\bar{Y}_\lambda = \frac{c}{T\lambda^2} \int Y_\nu(t) dt = \frac{A}{T\lambda^2} \left[ \frac{e}{h} \int J(t) U(t) dt - \frac{c}{\lambda} \int J(t) dt \right].$$

Если заданы кривые  $U(t)$  и  $J(t)$ , то из первой легко найти  $\tau$ , поскольку  $\nu_0(t) = \frac{e}{h} U(t)$ ; для этого достаточно провести на графике  $U(t)$  прямую, параллельную оси времен на уровне значения

$$U = \frac{h}{e} \nu = \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda}.$$

Точки пересечения с кривой  $U(t)$  определяют границы времени  $\tau$  для заданной  $\nu$ .

Дополнительно строится кривая  $f(t) = J(t) U(t)$ , и тогда по площадям участков кривых за время  $\tau$  находятся значения

$$\int J(t) U(t)$$

и

$$\int J(t) dt,$$

а значит и  $\bar{Y}_\nu$ .

Для  $U(t)$  в кВ,  $J(t)$  в мА и  $\lambda$  в  $\text{\AA}$  имеем

$$\begin{aligned} \bar{Y}_\lambda &= B \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{T} \left[ \frac{10}{3} \int J(t) U(t) dt - \frac{ch \cdot 10^8}{e \cdot \lambda} \int J(t) dt \right] = \\ &= B \frac{1}{\lambda^2} \frac{1}{T} \left[ \frac{10}{3} \int J(t) U(t) dt - \frac{41,3}{\lambda} \int J(t) dt \right]. \end{aligned}$$

Характеристическим спектром рентгеновских лучей называется спектр, возникающий в результате перехода атома данного вещества от одного энергетического уровня к другому и состоящий из дискретного ряда частот колебаний.

Характеристические лучи возникают только тогда, когда энергия движущего электрона или квант-энергия возбуждающего колебания больше или достигает значения кванта-энергии характеристического излучения:

$$e \cdot U \geq h\nu_x$$

или

$$h\nu_0 \geq h\nu_x$$

## Потенциал возбуждения наиболее жестких групп линий серий

$$K \text{ и } L \text{ различных элементов } \lambda_K = \frac{12,34}{U_K} \text{ и } \lambda_L = \frac{12,34}{U_L}$$

Z	K		L		Z	K		L	
	$U_K$	$\lambda_K$	$U_L$	$\lambda_L$		$U_K$	$\lambda_K$	$U_L$	$\lambda_L$
92 U	115	0,073	21,7	0,570	47 Ag	25,5	0,484	3,79	3,260
90 Tl	109	0,113	20,5	0,615	46 Pd	24,4	0,515	3,64	3,400
83 Bi	90,1	0,137	16,4	0,754	45 Rh	23,2	0,532	3,43	3,600
82 Pb	87,6	0,141	15,8	0,780	44 Rn	22,1	0,560	3,24	3,820
81 Tl	85,2	0,145	15,3	0,807	42 Mo	20,0	0,618	2,87	4,300
80 Hg	82,9	0,149	14,8	0,835	41 Nb	19,0	0,650	2,68	4,610
79 Au	80,5	0,153	14,4	0,860	40 Zr	18,0	0,685	2,51	4,920
78 Pt	78,1	0,158	13,9	0,890	39 V	17,0	0,725	2,36	5,230
77 Ir	76,0	0,162	13,4	0,920	38 Sr	16,1	0,770	2,19	5,640
76 Os	73,8	0,167	13,0	0,950	37 Rb	15,2	0,820	2,05	6,150
74 W	69,3	0,178	12,1	1,020	35 Br	13,5	0,915	1,77	7,000
73 Ta	67,4	0,183	11,7	1,055	34 Se	12,7	0,975	1,64	7,520
72 Hf	65,4	0,189	11,3	1,094	33 As	11,9	1,037	1,52	8,150
71 Cr	63,4	0,195	10,9	1,135	32 Ge	11,1	1,111	1,41	8,750
70 Ad	61,4	0,201	10,5	1,175	31 Ga	10,4	1,185	1,31	9,430
69 Tu	59,5	0,207	10,1	1,225	30 Zn	9,65	1,280	1,20	10,30
68 Er	57,3	0,215	9,73	1,270	29 Cu	8,86	1,383		
67 Ho	55,8	0,221	9,38	1,320	28 Ni	8,29	1,490		
66 Dy	53,8	0,230	9,03	1,370	27 Co	7,71	1,600		
65 Tb	52,0	0,237	8,70	1,420	26 Fe	7,10	1,740		
64 Gd	50,3	0,246	8,37	1,470	25 Mn	6,54	1,890		
63 Eu	48,6	0,254	8,04	1,540	24 Cr	5,98	2,030		
62 Sm	46,8	0,264	7,73	1,600	23 Va	5,45	2,270		
60 Nd	43,6	0,283	7,12	1,735	22 Ti	4,95	2,490		
59 Pr	41,9	0,295	6,83	1,810	21 Sc	4,49	2,750		
58 Ce	40,3	0,306	7,54	1,890	20 Ca	4,03	3,060		
57 La	38,7	0,319	6,26	1,970	19 K	3,59	3,440		
56 Ba	37,4	0,330	5,99	2,060	17 Cl	2,82	4,375		
55 Cs	35,9	0,344	5,71	2,160	16 S	2,46	5,050		
53 J	33,2	0,371	5,18	2,380	15 P	2,14	5,780		
52 Te	31,8	0,389	4,93	2,500	14 Si	1,83	6,750		
51 Sb	30,4	0,405	4,69	2,640	13 Al	1,55	7,790		
50 Sn	29,1	0,425	4,49	2,760	12 Mg	1,30	9,500		
49 In	27,9	0,442	4,28	2,890	11 Na	1,30	11,500		
48 Cd	26,7	0,462	4,07	3,041	9 F	0,68	18,300		

Частоты колебаний линий характеристического спектра атома есть аддитивное свойство его.

По Мезели, для наиболее интенсивной линии серии K,

$$\nu_K = \frac{3}{4} R(Z-1)^2,$$

где  $R$  — постоянная Ридберга.

Длина волн  $K$  — серни в  $X$  — единицах.  $IX = 0,001 A = 10^{-11}$  см (+ обозначает, что к числу нужно прибавить 0,5  $X$ , напр.  $11\ 883 + 0,5 = 11\ 883,5$ )<sup>1</sup>

Интенсивность		очень сильная	сильная	очень слабая	средн.	слабая	очень слабая
$Z$	элемент	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
9	F	18 300		—	—	—	—
11	Na	11 883+		11 802+	11 591	—	—
12	Mg	9 868		9 799+	9 534+	—	9 647
13	Al	8 819+		8 264+	7 940+	—	8 025
14	Si	7 109		7 064	6 739	—	6 744
15	P	6 142		6 102	5 786	—	5 820+
16	S	5 361	5 364	5 329+	5 021	—	5 045
17	Cl	4 718	4 721+	4 688	4 394	—	—
19	K	3 734	3 737	3 711	3 447	—	—
20	Ca	3 352	3 355	3 322	3 083+	3 067+	—
21	Sc	3 025	3 028+	3 006	2 774	2 755+	—
22	Ti	2 743	2 747	2 727	2 509	2 494	2 515
23	V	2 498	2 502	2 484+	2 280	2 264+	2 285
24	Cr	2 285	2 289	2 273	2 080+	2 067	2 086
25	Mn	2 097	2 101+	2 088	1 906	1 893	1 910+
26	Fe	1 932	1 936+	1 923	1 753	1 740+	1 756
27	Co	1 785	1 789+	1 777+	1 617	1 605+	1 620
28	Ni	1 654+	1 658+	1 647+	1 497	1 485+	1 499
29	Cu	1 537	1 541	1 531	1 389	1 378	—
30	Zn	1 432	1 436	1 429	1 292+	1 281	—
32	Ce	1 251	1 255	—	1 126+	1 114+	—
33	As	1 173+	1 177+	—	1 055	1 043	—
34	Se	1 102+	1 106+	—	990	978	—
35	Br	1 037+	1 041+	—	931	918	—
37	Rb	923+	928	—	827	815	—
38	Sr	873+	877+	—	781+	769	—
39	Y	827	831	—	739	727	—
40	Zr	784	788+	—	700+	688	—

<sup>1</sup> Относительно положения некоторых очень слабых линий элементов от F до Ca-см. Зигбан, „Спектроскопия рентгеновских лучей“, стр. 103, и Ландольт-Вернштейн, Физико-химические таблицы, 5 Aufl., Ergänzungsband, 1927, S. 324/325.



Интенсивность		очень сильная	сильная	очень слабая	средн.	слабая	очень слабая
Z	элемент	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
41	Nb	744+	749	—	664+	652+	—
42	Mo	708	712	—	631	620	—
43	Ma	672	675	—	601	—	—
44	Ru	642	646	—	571+	560+	—
45	Rh	612	616+	—	545	534	—
46	Pd	584	588+	—	520	509+	—
47	Ag	558	562+	—	496	486	—
48	Cd	534	538	—	474	464+	—
49	In	511	515+	—	454	444	—
50	Sn	489+	494	—	434+	425	—
51	Sb	469+	474	—	416	407	—
52	Te	450+	455	—	399	390+	—
53	J	432+	437	—	383+	375	—
55	Cs	399+	404	—	353+	345	—
56	Ba	384+	389	—	340+	332	—
57	La	370	375	—	328	320	—
58	Ce	356+	361	—	315+	303	—
59	Pr	348	343+	—	304	296	—
60	Nd	331	336	—	293	286	—
61	Il	320	324	—	281+	—	—
62	Sm	308+	313	—	273	266	—
63	Eu	298	303	—	263+	256+	—
64	Gd	288	292+	—	254	247+	—
65	Tb	278	283	—	246	239	—
66	Dy	269	274	—	237+	231	—
67	Ho	260	265	—	—	—	—
68	Er	252	257	—	222+	217	—
69	Tu	244	248+	—	215	—	—
70	Yb	238	241	—	209	203	—
71	Lu	229	233+	—	202	196+	—
72	Hf	222	226+	—	195+	190+	—

Интенсивность		очень сильная	сильная	очень слабая	средн.	слабая	очень слабая
Z	элемент	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
73	Ta	215	220	—	190	184+	—
74	W	209	213+	—	184	179	—
76	Os	196+	201	—	173+	169	—
77	Ir	191	195+	—	168	164	—
78	Pt	185	190	—	163+	159	—
79	Au	180	185	—	159	154	—
80	Hg	—	—	—	—	—	Граница поглощения К. 148
81	Tl	170	175	—	150	145+	—
82	Pb	165	170	—	146	141	—
83	Bi	160+	165	—	142	—	—
90	Th	—	—	—	—	—	Граница поглощения К. 113
92	U	126+	131	—	112	108+	—

Граница К полосы поглощения отвечает длине волны меньшей чем  $\lambda_{\beta_2}$  серии К на 1—2 X.

Длина волн линий  $L$  — серии в  $X$  — единицах, начиная с  $\lambda = 10\,000 X$ ,  $1 X = 0,001 \text{ \AA} = 10^{-11} \text{ см}$   
 (+ означает, что к числу нужно прибавить  $0,5 X$ , например  $8\,970 + = 8\,970,5 \text{ \AA}$ )

Линия	Ионизирующая способность	33 Au	34 Se	35 Br	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn
$\alpha_1$	с.	9650	8970+	8356	7303	6848	6436	6056	5711	5394	4836	4588	4358+	4145+	3948	3764	3592
$\alpha_2$	ср.																
$\alpha_3$	с.л.	9617	8938+	8326	7273	6818	6406+	6027	5688+	5372	4818	4572	4344	4132	3933	3750	3601
$\beta$	ср.	11047	10271	9563		7821	6898		6309		5486+	5207	4939+	4697	4471	4259	4063
$\gamma$	с.л.	11710	9939	9234	8029	7505	7030	6593	6195	5835		4911	4650	4410	4187+	3976	3782
$\beta_1$	с.	9394	8717	8107+	7060+	6603	6206	5823	5479+	5166	4611	4365	4137	3926	3730	3548	3371
$\beta_2$	ср.							5573+	5225	4909	4362	4122	3901	3694	3506	3331	3168
$\beta_3$	ср.				6768+	6357	5973	5618	5296+	5004	4476+	4245	4026	3824+	3636+		3299
$\beta_4$	ср.				6800	6391	6007	5651	5380	5040	4512+	4280	4062	3861	3674+	3499	3336
$\beta_6$	с.л.				6967	6567	6085	5692	5346+		4476+	4238	4007	3798+	3605+	3428	3262
$\beta_7$	о. с.л.												3620		3317	3149	
$\beta_8$	о. с.л.												3630		3260	3108	
$\beta_{10}$	о. с.л.												3663	3477+	3266	3114+	
$\beta_{11}$	о. с.л.												3654	3468+	3304	3142+	
$\beta_{12}$	о. с.л.														3296	3135	
$\gamma_1$	ср.							5373	5021	4711	4173	3936	3716+	3515	3328	3155	2995
$\gamma_2$	с.л.				6035	5630+	5268+	4940	4646	4869	4361	3681+	3481	3300	3130	2973+	2836
$\gamma_3$	с.л.															2919	2771
$\gamma_4$	о. с.л.									4830+	4276	4035	3811+	3607	3418	3242	3077+
$\gamma_5$	о. с.л.							5481				3897	3676	3479+	3302	3125	2968
$\gamma_7$	о. с.л.																
$L_{III}$					6841	6362	5944+	5561	5212	4904	4358	4118+		3693	3495		3147
$L_{II}$						6162	5787	5366	4946	4712	4165	3931+		3506	3322		2767
$L_I$					5985+	5571	5221+	4857+	4572	4290		3621		3245	3071		

Граница полосы поглощения (индекс в порядке возрастания длин волн)

Линия	Идентификация	51 Sb <sup>1</sup>	52 Te	53 I	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce <sup>2</sup>	59 Pr	60 Nd	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb <sup>3</sup>	66 Dy	67 Ho	68 Er
$\alpha_1$	с.	3432	3282	3142	2886	2769+	2660	2556	2458	2365	2195	2116	2042	1971+	1904+	1841	1780+
$\alpha_2$	ср.	3441	3291	3151	2895+	2779	2689	2565	2467+	2375+	2206	2127	2052+	1982	1915+	1852	1791+
$\beta$	ср.	3880	3710	3550	3259+	3129	3000	2886	2778	2670	2477	2390	2307	2229	2154	2082	2015
$\mu$	ср.	3399+			2983	2857	2734	2615	2507	2404	2214			1892	1822	1755	
$\beta_1$	с.	3218	3070	2931	2678	2562	2453	2331	2254	2162	1993+	1916	1842+	1773	1706+	1643+	1583+
$\beta_2$	ср.	3016+	2876	2746	2506+	2399	2293	2201	2115	2031+	1878	1808	1742	1679	1620	1564	1510+
$\beta_3$	ср.	3145	3001	2868	2623	2511	2405	2306	2212+	2122	1958	1883	1811	1742+	1678	1616	1558
$\beta_4$	ср.	3181	3040	2906	2660+	2550	2444	2344	2250	2162	1996+	1922	1849	1781+	1717	1655	1596+
$\beta_6$	с.	3108	2964	2830+	2587+	2477	2374	2277	2186	2099	1942	1870+	1803	1737+	1678	1619	1563+
$\beta_7$	о. с.л.	2966			2480	2375+	2270	2176	2087+	2004	1852	1784	1719+	1656	1596	1489	1482
$\beta_9$	о. с.л.	2972+			2473	2371	2277	2184	2096	2012	1858	1788	1728	1664			
$\beta_{10}$	о. с.л.	2993+			2483	2382	2285	2191+	2102	2019	1866	1796	1728	1664			
$\beta_{11}$	о. с.л.							2212	2122	2039	1987	1909	1835+	1765+	1699	1635+	1575+
$\beta_{13}$	о. с.л.										1885	1781+	1748	1685	1626	1567	1512
$\beta_{14}$	о. с.л.																
$\gamma_1$	ср.	2945	2706+	2577+	2342+	2236+	2137	2044	1957	1874	1723	1654	1588+	1626+	1470	1414	1362
$\gamma_2$	с.л.	2695	2565	2442	2232	2134	2041+	1956	1875	1797+	1656	1594	1531	1474	1420	1386	1318+
$\gamma_3$	с.л.	2633+	2506	2368	2227	2129	2036+	1951	1870	1792+	1652	1588	1526	1468	1414	1361	1312
$\gamma_4$	о. с.л.	2925+	2783		2169	2071+	1979	1895	1815	1741	1603	1541	1482	1424	1371+	1320	1273
$\gamma_5$	о. с.л.				2411	2302	2201	2105+	2016	1931	1775	1705	1637+	1574	1515	1459	1403
$\gamma_7$	о. с.л.					2218		2029	1942	1859		1644					
$\gamma_8$	о. с.л.					2218		2019	1932			1629					
$\gamma_9$	о. с.л.							2051	1962		1728+	1659	1593+	1531+		1416	
$\gamma_{10}$	о. с.л.				2237	2140	2048	1962	1881								

Граница полосы поглощения (нижеслы в порядке возрастания длин волн)

$L_{II}$	2994+	2847	2712	2464+	2357	2250	2158	2075	1991	1641	1772	1699	1645	1576	1532	1478
$L_{II}$	2831	2684	2543	2307+	2199	2098	2007	1920	1839	1699	1623	1550	1498	1435	1387	1336
$L_I$	2633	2502	2392	2160+	2062	1971	1887	1807	1732	1595+	1533	1474	1418	1362	1314+	1265

<sup>1</sup>  $\beta_{13}$  2086; <sup>2</sup>  $\beta_6$  2106; <sup>3</sup>  $\beta_5$  1656

Линия	Интенсивность	70 Yb	71 Sr	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Tr	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Th	91 Pa	92 N
$\alpha_1$	с.	1668	1615+	1566	1518	1473+	1430	1389	1348+	1310	1274	1238+	1205	1172+	1141	954	931	909
$\alpha_2$	ср.	1679	1626+	1577	1529+	1484+	1441	1398	1360	1321+	1285	1250	1216	1183+	1153	965	943	920
$\beta_1$	ср.	1890	1832	1777+	1724	1675	1627	1540	1540	1497	1456+	1418	1385	1346+	1313	1112+	1088+	1065
$\beta_2$	с.	1631	1574	1520	1465	1418	1371	1240	1199+	1162	1125	1090	1057	1090	1057	828	828	803
$\beta_3$	с.	1477+	1421	1371	1323+	1279	1235	1194+	1155+	1117+	1081	1046+	1013	981	950	763+	741	718+
$\beta_4$	ср.	1413	1367	1323+	1281	1242	1205	1168+	1133	1100	1068	1038	1008	981	953	782	773	758
$\beta_5$	ср.	1449+	1398	1350	1303	1260	1216	1177	1138	1099+	1068	1030	998	966	936	752	745+	708+
$\beta_6$	ср.	1488	1437	1389	1342	1299	1256	1215	1176+	1140	1104+	1068+	1037	1005	975+	789	774	745+
$\beta_7$	о. с.л.	1463	1414	1371	1327	1287	1248	1205	1172	1140	1110+	1077	1048	1019	991+	762+	806	786+
$\beta_8$	о. с.л.	1346	1346	1302+	1260	1221	1183	1124	1087+	1078+	1046+	1008	988	959	894	826	753	736
$\beta_9$	о. с.л.	1333	1333	1287	1243	1202	1162	1124	1087+	1078+	1046+	1008	988	959	894	826	753	736
$\beta_{10}$	о. с.л.	1340	1340	1297	1250	1209+	1170	1124	1087+	1078+	1046+	1008	988	959	894	826	753	736
$\beta_{11}$	о. с.л.	1383	1383	1335	1293	1251	1210	1168	1127	1093	1061	1029	997	965	933	901	869	837
$\gamma_1$	ср.	1265	1220	1176+	1135	1096	1059	1022+	989	956	924+	894+	866	838	811+	652	613	613
$\gamma_2$	с.л.	1225+	1183	1141	1102	1066	1030	993+	963+	932	901	869+	845	818	793	604+	604+	604+
$\gamma_3$	с.л.	1220	1177+	1135+	1096	1060	1024	987+	956+	925+	897	869+	838	814	787+	610	597	597
$\gamma_4$	о. с.л.	1182	1141	1100	1062+	1026	991	954	917	885	866	835	810	783+	761	592+	592+	592+
$\gamma_5$	о. с.л.	1303	1256	1212	1170	1129	1091	1054	1020	985+	954	914+	894	864	838	654	612	612
$\gamma_6$	о. с.л.	1303	1256	1212	1170	1129	1091	1054	1020	985+	954	914+	894	864	838	654	612	612

Граница полосы поглощения (индексы в порядке возрастания длин волн)

$L_{III}^3$	1386	1338	1293	1252	1211+	1174	1138	1093	1057	1020+	987	951+	919	892	861	833+	805+	780
$L_{II}^4$	1239	1194+	1151+	1110	1071	1034	998+	965	932	901	870	841+	813	787+	756+	728+	707	680
$L_I$	1171	1136	1095	1057	1020+	987	951+	919	892	861	833+	805+	780	756+	728+	707	680	654

<sup>1</sup>  $\alpha_3$  1514,  $\gamma_7$  1102+; <sup>2</sup>  $\gamma_8$  1079; <sup>3</sup>  $\beta_0$ /84/а, 1101,  $\beta_1$  92<sup>3</sup>; <sup>4</sup>  $Ra$ /88/а, 1010,  $L_{III}$  802,  $L_{II}$  668



Прецизионные измерения стандартных линий (H-серия)

$Z_1$	Элемент	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	Наблюдатель
29	Cu	1537,29	1541,02	1389,29	1377,98	Лейде
42	Mo	707,80	712,08	631,24	619,69	Лейде
47	Ag	558,21	562,64	496,33	486,10	Лейде
74	W	208,85	213,52	184,36	179,40	Зигбан
78	Pt	185,23	190,04	163,70	158,87	Корк — Стефенсон
Граница полосы поглощения						
35	Br		918,09			Лейде
47	Ag		484,80			Лейде

Интенсивность линий характеристического спектра излучения по Вобстеру и Кларку

$$I_k = c \cdot J \cdot (U - U_k)^n,$$

где  $n = 1,5$  для серии K,

и  $n = 2,0$  для серии L.

## § 2. Энергетические величины и соотношения

Суждение о рентгеновском излучении возможно лишь по тому действию, которое оно производит в среде, поглощающей энергию лучей.

В области рентгеновских лучей основным количественным понятием является энергия излучения  $W$ .

Энергия, отнесенная к единице поверхности, представляет собой поверхностную плотность излучения:

$$E = \frac{dW}{dS}.$$

Энергия, отнесенная к единице времени, дает мощность излучения (или поток лучистой энергии):

$$N = \frac{dW}{dt}.$$

Мощность излучения, отнесенная к единице поверхности, дает интенсивность излучения

$$I = \frac{dN}{dS}.$$

Очевидно

$$W = \int_S \int_t I \cdot ds \cdot dt.$$

При рассмотрении практически однородного излучения длины волны  $\lambda$  под интенсивностью  $I_\lambda$  подразумевается

$$I_\lambda = Y_\lambda \Delta\lambda,$$

где  $\Delta\lambda$  некоторый достаточно узкий интервал спектра.

Объемная плотность излучения  $M$  есть энергия излучения, отнесенная к единице объема.

Очевидно,

$$M = \frac{dW}{dv} = \frac{I}{c},$$

где  $c$  — скорость света.

Объемная плотность поглощенной (преобразованной в другой вид) энергии излучения называется физической дозой:

$$D = \frac{dW_a}{dv}.$$

Эта величина получается непосредственно из измерений.

Физическая доза, отнесенная к единице времени, дает мощность дозы (мощность поглощения)

$$P = \frac{dD}{dt} = \frac{dN_a}{dv}.$$

Между интенсивностью излучения и мощностью физической дозы в какой-либо поглощающей среде имеет место соотношение

$$P = I\gamma,$$

где  $\gamma$  — коэффициент электронного преобразования, зависящий от качества излучения и свойств среды.

Таким образом для нахождения  $I$  по измеренному  $P$  необходимо знать  $\gamma$ .

### § 3. Поглощение и рассеяние рентгеновских лучей

Ослабление интенсивности рентгеновских лучей по мере проникновения их в какую-либо среду происходит не только вследствие геометрии пучка (закон квадратов расстояний), но также вследствие поглощения и рассеяния.

Закон ослабления интенсивности для однородного излучения имеет вид

$$I = I_0 \left( \frac{a}{a+x} \right)^2 e^{-\mu x},$$

где  $x$  — толщина ослабляющего слоя,  $a$  — расстояние от источника до поверхности, на которой  $I = I_0$  и  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления лучей в среде слоя  $x$ . Коэффициент ослабления представляет собой сумму двух коэффициентов: фотоэлектрического поглощения  $\tau$  и рассеяния  $\sigma$ :

$$\mu = \tau + \sigma.$$

Так как  $\mu$ ,  $\tau$  и  $\sigma$  прямопропорциональны плотности среды, то для любой среды характерным являются соответствующие массовые коэффициенты

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho},$$

где  $\rho$  — плотность среды.



Значения массовых коэффициентов ослабления  $\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho}$  по измерениям различных авторов с однородными рентгеновскими лучами

$\lambda =$	0,081	0,030	0,100	0,150	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,631	0,700	0,709	0,800
C Z = 6 Графит $\rho = 2,3 \frac{e}{\text{см}^3}$	Хевлетт .....	—	—	0,144	0,163	0,173	0,202	0,241	0,304	0,429	0,528	0,543	0,706
	Аллен 1924.....	—	—	0,146	0,151	0,162	0,190	0,245	0,326	0,550	—	0,63	—
	Аллен 1926.....	0,143	0,148	0,150	0,153	0,165	—	—	—	—	—	0,63	0,900
Al Z = 13 $\rho = 2,7 \frac{e}{\text{см}^3}$	Хевлетт .....	—	—	—	0,200	0,270	0,560	0,930	1,85	3,50	4,95	5,06	7,24
	Рихтмейер .....	—	—	0,160	0,200	0,270	0,560	1,08	1,96	3,25	5,07	5,26	7,48
	Аллен 1924.....	—	—	0,160	0,205	0,275	0,545	1,11	1,94	—	—	5,35	—
	Аллен 1926 .....	0,145	0,160	0,163	0,203	0,273	—	—	1,94	—	—	—	—
	Ионссон 1928 .....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,41
Беккерст 1929.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,0	—	7,4
Fe Z = 26 $\rho = 7,7 - 7,9 \frac{e}{\text{см}^3}$	Хевлетт .....	—	—	—	0,62	1,06	3,09	7,02	13,8	22,6	35,3	36,5	50,7
	Рихтмейер .....	—	—	—	0,55	1,06	3,15	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	0,58	1,07	3,30	7,25	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	0,235	0,250	0,270	0,59	—	—	—	—	—	—	33,4	—
Cu Z = 29 $\rho = 8,9 \frac{e}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1921 .....	—	—	0,650	1,00	1,63	4,46	9,92	18,9	32,3	—	—	—
	Рихтмейер 1926 .....	—	—	0,350	0,720	1,41	4,31	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	0,780	1,55	4,50	10,2	19,0	—	—	53,7	—
	Аллен 1926.....	0,270	0,295	0,330	0,770	1,55	—	—	19,3	33,0	—	52,0	72,0
	Ионссон 1928 .....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	51,4	—
Бекх-рст 1929.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49	—	70,8
Mo Z = 42 $\rho = 10,2 \frac{e}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1921 .....	—	—	0,850	1,92	4,00	12,6	—	—	—	18,7	19,4	27,5
	Рихтмейер 1926 .....	—	—	1,38	2,26	4,00	11,1	25,0	48,0	82,0	13,8	18,9	26,7

$\lambda =$		0,081	0,090	0,100	0,150	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,681	0,700	0,709	0,800
Ag Z = 47 $\rho = 10,5 \frac{г}{см^3}$	Рихтмейер 1921 . . .	—	—	1,30	2,75	5,53	17,0	39,3 K	11,4	19,2	22,0	—	—	—
	Рихтмейер 1926 . . .	—	—	1,55	2,84	5,36	15,8	35,9	9,75	16,1	18,4	25,0	26,0	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	1,04	2,63	5,50	17,9	38,2	10,5	—	20,5	—	28,5	—
	Аллен 1926 . . . . .	0,740	0,900	1,13	2,63	5,60	—	—	10,0	—	—	25,0	26,8	41,0
	Ионссон 1928 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Беккерст 1929 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,5	—	37,6
Zn Z = 50 $\rho = 7,3 \frac{г}{см^3}$	Рихтмейер 1926 . . .	—	—	1,53	2,94	5,60	16,5	37,7 K	12,2	20,4	22,4	31,8	33,2	—
	Рихтмейер 1927 . . .	—	—	—	—	5,80	18,0	40,0	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	3,00	6,30	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	0,800	0,950	1,14	3,10	6,20	—	—	12,0	—	—	—	32,5	47,0
W Z = 74 $\rho = 19,1 \frac{г}{см^3}$	Рихтмейер 1924 . . .	—	—	2,67	7,10	3,44	9,72	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	3,80	8,10	3,29	8,60	19,8	38,0	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	2,40	2,80	3,40	7,90	3,50	—	—	—	—	75,0	—	—	—
	Ионссон . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pt Z = 78 $\rho = 21,4 \frac{г}{см^3}$	Аллен 1924 . . . . .	—	—	3,40	—	4,16	11,5	24,5	45,5	—	87,0	—	119,0	—
	Аллен 1926 . . . . .	2,50	2,95	3,70	7,80	4,20	—	—	—	—	87,0	—	119	150
	Ионссон . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	75,2	—	—	—	—
	Беккерст . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	107	—	151
	Ионссон . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Au Z = 79 $\rho = 19,3 \frac{г}{см^3}$	Рихтмейер . . . . .	—	—	3,07	8,67	4,01	11,5	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	3,00	—	4,28	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	2,44	2,85	3,60	7,98	4,35	—	—	—	—	—	—	122	150
	Беккерст . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	110	—	162
	Ионссон . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb Z = 82 $\rho = 11,3 \frac{г}{см^3}$	Рихтмейер 1921 . . .	—	—	—	2,47	4,83	14,5	33,7	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926 . . .	—	—	3,27	2,31	4,51	18,6	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	3,40	2,37	4,64	13,6	31,8	58	—	102	—	140	—
	Аллен 1926 . . . . .	2,53	3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	147
U Z = 92 $\rho = 18,7 \frac{г}{см^3}$	$\lambda =$	—	0,095 K	0,113	0,126	0,14	0,151	0,164	$\Lambda^0$	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	—	3,53	1,78	1,90	2,56	3,78	5,24	—	—	—	—	—	—

$\lambda =$		0,900	0,925	1,000	1,090	1,100	1,175	1,293	1,348	1,390	1,433	1,540	1,655	1,752
C Z = 6 Графит $\rho = 2,3 \frac{e}{cM^3}$	Хевлетт.....	0,934	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	1,20	—	1,50	2,0	—	2,4	3,2	—	3,8	4,3	4,9	6,4	7,3
Al Z = 13 $\rho = 2,7 \frac{e}{cM^3}$	Хевлетт.....	10,1	—	13,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	10,4	—	14,2	18,5	—	22,5	29,8	—	36,0	40,3	48,5	61,5	73,2
	Ионссон 1928.....	—	11,8	—	—	19,7	23,1	27,7	—	—	41,8	51,2	61,1	—
Беккерет 1929.....	10,4	—	14,2	—	18,6	22,5	29,9	—	—	37,3	40,1	49,0	—	72,5
Fe Z = 26 $\rho = 7,7 - 7,9 \frac{e}{cM^3}$	Хевлетт.....	68,3	—	90,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	—	102,0	128	—	160	213	—	—	290	330	430	56
Cu Z = 29 $\rho = 8,9 \frac{e}{cM^3}$	Рихтмейер 1921.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	98,0	—	133	165	—	206	266	—	38,0	42,0	50,0	64,0	76,0
	Ионссон 1928.....	—	—	—	—	176	206	262	287	37,8	42,6	50,4	65,1	—
Беккерет 1929.....	97,7	—	134,3	—	171	204	265	290	—	45,0	53,1	—	79,4	
Mo Z = 42 $\rho = 10,2 \frac{e}{cM^3}$	Рихтмейер 1921.....	33,5	—	52,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	37,5	—	51,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

$\lambda =$		0,900	0,925	1,000	1,090	1,100	1,175	1,293	1,348	1,390	1,433	1,540	1,655	1,752
$\text{Ag } Z = 47$ $\rho = 10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1921 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	55,0	—	73	—	95	146	173	—	173	192	225	280	325
	Ионссон 1928 . . . . .	—	—	—	—	97	146	175	—	175	193	212	285	—
Беккерст 1929 . . . . .	51,9	—	68,4	—	91,5	143	174	—	174	186	227	276	327	
$\text{Zn } Z = 50$ $\rho = 7,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1927 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	64,0	—	87,0	110	—	132	176	—	205	235	—	—	385
$\text{W } Z = 74$ $\rho = 19,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	—	105	—	—	130	—	—	—
$\text{Pt } Z = 78$ $\rho = 21,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	100	131	—	155	171	199	243	208
	Ионссон . . . . .	—	—	—	18,4	—	110	135	—	153	173	206	238	—
	Беккерст . . . . .	169	—	—	—	—	100	128	—	154	168	197	244	289
$\text{Au } Z = 79$ $\rho = 19,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Рихтмейер . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	104	137	—	168	179	210	265	—
	Беккерст . . . . .	—	—	179	87,1	—	107	139	—	168	182	217	261	303
$\text{Pb } Z = 82$ $\rho = 11,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Рихтмейер 1921 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924 . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926 . . . . .	—	—	77	98	—	120	154	—	180	202	230	290	335

		1,787	1,933	2,000	2,500	2,744	3,026	3,353	4,146	4,360	5,394	6,973	8,320	9,868	и др.
$\lambda =$															
<p>C Z = 6 Графит <math>\rho = 2,3 \frac{г}{см^3}</math></p>	Хевлетт.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	9,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Хевлетт.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Al Z = 13 <math>\rho = 2,7 \frac{г}{см^3}</math></p>	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	94,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ионссон 1928.....	72,0	93,9	—	182	248	320	433	771	894	1480	2800	344	533	767
	Беккерст 1929.....	76,7	96,6	110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Хевлетт.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Fe Z = 26 <math>\rho = 7,7 - 7,9 \frac{г}{см^3}</math></p>	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Хевлетт.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Cu Z = 29 <math>\rho = 8,9 \frac{г}{см^3}</math></p>	Рихтмейер 1921.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ионссон 1928.....	85,6	100	—	202	262	321	404	621	730	1300	2120	3450	5030	7550
Беккерст 1929.....	83,8	106	116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
<p>Mo Z = 42 <math>\rho = 10,2 \frac{г}{см^3}</math></p>	Рихтмейер 1921.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

$\lambda =$		1,787	1,938	2,000	2,500	2,744	3,026	3,358	4,146	4,360	5,394	6,979	8,320	9,868	$\mu, \text{м.к.}^\circ$
		$L_I, L_{II}, L_{III}$													
<p>Ag Z = 47 <math>\rho = 10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Рихтмейер 1921.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	410	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Йонссон 1928.....	—	407	—	696	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Беккерст 1929.....	—	431	—	—	—	925	1330	1310	461	539	852	1260	1770	2720	
<p>Zn Z = 50 <math>\rho = 7,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1927.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	490	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>W Z = 74 <math>\rho = 19,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Рихтмейер 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Pt Z = 78 <math>\rho = 21,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	365	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Йо ссон.....	291	351	408	596	756	939	1120	1290	—	1640	1190	1530	2440	
	Беккерст.....	303	376	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Au Z = 79 <math>\rho = 19,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Рихтмейер.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Беккерст.....	—	386	427	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<p>Pb Z = 82 <math>\rho = 11,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}</math></p>	Рихтмейер 1921.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Рихтмейер 1926.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Аллен 1924.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Аллен 1926.....	—	420	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Соответственно уровням энергии атома, поглощение рентгеновских лучей происходит полосами —  $K$ ,  $L$ ,  $M$  и так далее полосы поглощения.

По мере увеличения длины волны излучения, а значит уменьшения частоты колебаний, коэффициент поглощения возрастает, однако вблизи частот колебаний, отвечающих собственному характеристическому излучению атома, вследствие прекращения эмиссии фотоэлектронов с соответствующего уровня энергии происходит резкое изменение его от большего значения к меньшему. Значение длины волны, при которой имеет место скачок в изменении коэффициента поглощения, называется границей поглощения.

Величина скачка

$$\delta_K = \left( \frac{\tau_K}{\tau_L} \right)_{\lambda_K} \approx \frac{\nu_K}{\nu_{L1}}$$

или

$$\delta_L = \left( \frac{\tau_L}{\tau_M} \right)_{\lambda_L} \approx \frac{\nu_{L1}}{\nu_{M1}}$$

зависит от рода вещества, убывая с увеличением атомного номера, причем скачок на границе  $K$  полосы всегда меньше, чем на границе  $L$  полосы поглощения, поскольку различно изменяется относительное влияние эмиссируемых электронов, отвечающих различным уровням энергии атома, по отношению к общему числу эмиссируемых фотоэлектронов.

Коэффициент поглощения  $\frac{\tau}{\rho}$  в сильной мере зависит от длины волны излучения  $\lambda$  и атомного номера вещества  $Z$ :

$$\frac{\tau}{\rho} = c \cdot \frac{Z^m}{A} \cdot \lambda^n,$$

где  $A$  — атомный вес вещества, причем

$$m = 4 \text{ для } \lambda < \lambda_K$$

и

$$m = 4,4 \text{ для } \lambda > \lambda_K$$

Для  $K$  полосы поглощения

по Аллену

$$n = 2,92$$

и

$$c = 1,32 \cdot 10^{-2}.$$

Значения постоянных  $c$  и  $n$  в формуле фотоэлектрического поглощения

$$\frac{\tau}{\rho} = c \cdot \lambda^n \text{ по Аллену}$$

Элемент	Z	Область применения формулы в Å	Полоса поглощения	c	n
C	6	0,08 — 2,6	K	1,38	2,92
Al	13	0,08 — 3,93	K	13,95—14,00	2,92
Fe	26	0,08 — 0,6	K	104—108	2,92
		0,6 — K — граница	K	102	2,87
		K — граница — 3,74	L	10,7	2,92
Ni	28	0,08 — 0,8	K	128—132	2,92
		0,8 — K — граница	K	116—118	2,75
		K — граница — 3,37	L	13,3	2,92
Cu	29	0,08 — 0,85	K	142—144	2,92
		0,85 — K — граница	K	182	2,70
		K — граница — 3,74	L	14,5	2,92
Zn	30	0,08 — 0,9	K	162—165	2,92
		0,9 — K — граница	K	152	2,67
		K — граница — 3,24	L	17,25	2,92
Ag	47	0,08 — K — граница	K	540—580	2,92
		K — граница — 1,10	L	73	2,92
		1,10 — 2,50	L	76—78	2,6
		L — граница — ?	M	10,0	2,92
Sn	50	0,08 — K — граница	K	650—670	2,92
		K — граница — 1,20	L	86—87	2,92
		1,20 — 2,50	L	89—90	2,6
		L — граница — ?	M	12—13	2,92
W	74	0,08 — K — граница	K	1840	2,92
		K — граница — L — граница	L	285	2,92
		L — граница — 1,0	M	52	2,92
		1,0 — M — граница	M	52	2,6
Pt	78	0,08 — K — граница	K	2000—2300	2,92
		K — граница — L — граница	L	345	2,92
		L — граница — 1,1	M	65	2,92
		1,1 — M — граница	M	66	2,6
Au	79	0,08 — K — граница	K	2000—2300	2,92
		K — граница — L <sub>III</sub> — граница	L	360	2,92
		L <sub>I</sub> — граница — 1,1	M	69	2,92
		1,1 — M — граница	M	70	2,6
Pb	82	0,08 — K — граница	K	2000—2400	2,92
		K — граница — L <sub>III</sub> — граница	L	440	2,92
		L <sub>I</sub> — граница — 1,15	M	77	2,92
		1,15 — M — граница	M	76—78	2,6
U	92	1,0 — M <sub>V</sub> — граница	M	110—120	2,6
		M <sub>I</sub> — ?	N	9—10	2,92



## Приближенные формулы и значения массового коэффициента ослабления

$$\frac{\mu}{\rho} = \alpha\lambda^3 + \beta$$

для различных материалов

Материал	Z	Область применения в Å	$\frac{\mu}{\rho}$	Автор
C	6	—	$1,025\lambda^3 + 0,175$	Кюстнер
Воздух	7,69	0,36 — 0,85 Å	$\left\{ \begin{array}{l} 2,62\lambda^3 + 0,17 \\ 2,56\lambda^3 + 0,17 \end{array} \right.$	"
Вода	7,43	$> 0,85 \text{ Å}$		
Целлон	6,1	0,5 — 2,0	$1,07\lambda^3 + 0,17$	"
Al	13	0,1 — 0,4 Å	$\left\{ \begin{array}{l} 14,45\lambda^3 + 0,15 \\ 14,30\lambda^3 + 0,16 \\ 15,5\lambda^3 + 0,147 \end{array} \right.$	Рихтмейер
		0,4 — 0,7		Дуане-Мацумдер
		0,095 — 0,165		Вингард
		0,15 — 0,25	$15,6\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho}$	Вингард
Fe	26	0,1 — 0,3	$110\lambda^3 + 0,18$	Рихтмейер
Co	27	0,15 — 0,35	$\left\{ \begin{array}{l} 124\lambda^3 + 0,18 \\ 136\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho} \end{array} \right.$	"
		0,15 — 0,25		Вингард
Ni	28	0,1 — 0,3	$\left\{ \begin{array}{l} 145\lambda^3 + 0,20 \\ 169\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho} \end{array} \right.$	Рихтмейер
		0,15 — 0,25		Вингард
Cu	29	0,1 — 0,3	$\left\{ \begin{array}{l} 153\lambda^3 + 0,20 \\ 147\lambda^3 + 0,5 \\ 193\lambda^3 + 0,13 \end{array} \right.$	Рихтмейер
		0,1 — 0,6		Дуане-Мацумдер
		0,095 — 0,165		Вингард
Zn	30	0,15 — 0,25	$200\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho}$	Вингард
Mo	42	0,1 — 0,35	$\left\{ \begin{array}{l} 450\lambda^3 + 0,4 \\ 51\lambda^3 + 1 \end{array} \right.$	Рихтмейер
				"
Ag	47	0,15 — 0,25	$\left\{ \begin{array}{l} 660\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho} \\ 603\lambda^3 + 0,7 \\ 86\lambda^3 + 0,6 \end{array} \right.$	"
		0,1 — 0,4		"
				"
Sn	50	0,15 — 0,25	$780\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho}$	Вингард
Pb	82	$> \lambda_K$	$510\lambda^3 + 0,75$	Рихтмейер
В пределах 5—7% от среднего значения из измерений для всех элементов		0,1 — 1,0	$\left\{ \begin{array}{l} 1,6 \cdot 10^{-2} \frac{Z^{3,94}}{A} \cdot \lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho} \\ \text{для } \lambda < \lambda_K \\ 0,053 \cdot 10^{-2} \frac{Z^{4,30}}{A} \cdot \lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho} \\ \text{для } \lambda > \lambda_K \end{array} \right.$	
Кровь	—			—
Мышцы	—	—	$2,2\lambda^3 + 0,18$	"
Кость	—	—	$11,0\lambda^3 + 0,18$	"
Жир	—	—	$1,6\lambda^3 + 0,18$	"

$\lambda =$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0
Воздух	0,14	0,17	0,23	0,31	0,46	0,74	1,00	1,53	2,11	2,75	7,76	16,4
Вода	0,17	0,20	0,26	0,36	0,50	0,71	1,00	1,43	2,01	2,71	8,63	19,9
$\lambda =$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	
Воздух	29,9	47,9	71,5	101	138	182	291	466	616	851	1120	
Вода	39,1	66,4	104	152	214	295	501	794	1170	1660	2260	

10 см воздуха ослабляют излучение, так же как 0,1 мм целлона.

Значения скачка поглощения  $\delta_K$  и отношения числа эмиссируемых  $K$  — электронов  $n_K$  к общему числу фотоэлектронов  $n_K + n_L + \dots$

Элемент	Рихтмейер 1921	Вильямс и Воренц 1921	Рихтмейер и Вардуртон 1924, 1926	Сторер и Мартин 1925	Аллен 1926 max min	Новосон 1928 (вычисл.)	Новосон 1928	Рихтмейер 1927			Аулер 1926	$\frac{n_K}{n_K + n_L}$	$\frac{\nu_K}{\nu_{L1}}$	$\frac{n_K}{\frac{n_K + n_L + \dots}{\delta_K - 1}} = \frac{n_K}{\delta_K}$
								$\frac{\sigma}{\rho} = 0$	$\frac{\sigma}{\rho} = 0,2$	$\frac{\sigma}{\rho} = 1,0$				
13 Al.....	—	—	—	—	—	—	12,6	—	—	—	—	13,3	0,92	
26 Fe.....	—	—	—	—	10—9,5	9,2	—	—	—	—	—	8,5	0,89	
28 Ni.....	—	—	—	—	9,8—8,8	8,2	8,3	—	—	—	—	8,3	0,88	
29 Cu.....	—	—	—	—	9,8—9,1	8,5	8,2	—	—	—	—	8,2	0,88	
30 Zn.....	—	—	—	—	9,5—8,8	7,5	—	—	—	—	—	8,2	0,88	
36 Kr.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,1	7,6	0,87	
42 Mo.....	8,7	7,06	7,5	—	—	—	—	6,55	6,63	7,02	—	6,9	0,86	
46 Pd.....	—	—	—	6,8	—	—	—	—	—	—	—	6,8	0,85	
47 Ag.....	7,3	6,76	7,8	6,7	7,7—7,3	—	—	6,05	6,12	6,65	—	6,7	0,85	
50 Sn.....	—	—	6,6	6,1	7,6—6,9	—	—	5,86	5,98	6,56	—	6,5	0,85	
54 X.....	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,6	6,3	0,84	
74 W.....	—	—	5,65	—	6,4—?	—	—	—	—	—	—	5,7	0,82	
78 Pt.....	—	—	—	—	6,0	—	—	—	—	—	—	5,6	0,82	
79 Au.....	—	—	5,65	—	5,8	—	—	3,9	4,2	6,5	—	5,6	0,82	
82 Pb.....	—	3,5	5,4	—	5,0	—	—	—	—	—	—	5,5	0,82	

Значений скачка поглощения  $\delta_L$  и отношения числа эмиссируемых  $L$  электронов  $n_L$  к общему числу фотоэлектронов

Элемент	Де-Бройль 1922	Довилье 1924	Стонер и Мар- тин 1925	Аллен 1926	Келль- стрем 1927.	Ионссон 1928	Аугер 1926	$\frac{\nu_{L_I}}{\nu_{M_I}}$	$\frac{1 - \delta_L}{n_L + n_M + n_N + \dots} = \delta_L$
47 Ag	—	—	—	—	5,8	5,3	—	5,24	0,81
54 X	—	—	—	—	—	—	6,3	—	—
74 W	—	—	—	5,5	—	—	—	4,29	0,77
78 Pt	7,1	—	—	5,3	—	—	—	4,22	0,76
79 Au	—	4,2	—	5,2	—	—	—	4,19	0,76
82 Pb	—	—	—	5,6	—	—	—	4,12	0,76
92 U	—	—	4	—	—	—	—	3,92	0,75

Таблица 32

Значений частных скачков поглощения  $\delta_{L_I}$ ,  $\delta_{L_{II}}$ ,  $\delta_{L_{III}}$  и отношений числа соответствующих эмиссируемых электронов

Элемент	Автор	$\delta_{L_I}$	$\delta_{L_{II}}$	$\delta_{L_{III}}$	$\delta_{L_I} = \frac{\delta_{L_{II}} \delta_{L_{III}}}{\delta_{L_I}}$	$\frac{1 - \delta_{L_I}}{n_L + n_M + n_N + \dots} = \delta_{L_I}$	$\frac{1 - \delta_{L_{II}}}{n_L + n_M + n_N + \dots} = \delta_{L_{II}}$	$\frac{1 - \delta_{L_{III}}}{n_L + n_M + n_N + \dots} = \delta_{L_{III}}$
47 Ag	Келлстром	1,25	1,47	3,17	5,8	0,20	0,26	0,37
78 Pt	Де-Бройль	1,4	1,8	2,8	7,1	0,29	0,31	0,26
79 Au	Довилье	1,2	1,4	2,5	4,2	0,17	0,23	0,36

Поглощение рентгеновских лучей есть аддитивное свойство атомов, почему для молекул или механических смесей возможно введение эффективного атомного номера:

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{\frac{a_1 Z_1^4 + a_2 Z_2^4 + \dots}{a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots}}$$

где  $a_1, a_2$  — весовые количества отдельных элементов в единице объема вещества.

Очевидно также, что

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_x = a_1 \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_1 + a_2 \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_2 + \dots$$

По Ионссону для  $K$  полосы поглощения' всех элементов имеет место универсальное соотношение

$$\tau_e = \frac{\tau_{At}}{Z} = \frac{\tau}{\rho} \cdot \frac{A}{Z} \cdot \frac{1}{N} = C \cdot (Z\lambda)^{f(Z\lambda)}$$

где  $f(Z\lambda)$  монотонно убывает от значения 3 при  $Z \cdot \lambda = 8$  до 2,3 при  $Z \cdot \lambda = 770$ . ( $N$  — число Авогадро).

Отсюда вытекает, что

$$\lg(\tau_e \cdot N) = f(Z\lambda) \cdot \lg(Z\lambda) + \lg C$$

приблизительно выражается прямой линией.

Для нахождения значения массового коэффициента поглощения  $\frac{\tau}{\rho}$  необходимо найденное по графику рис. 29 значение  $(\tau_e \cdot N)$

умножить на  $\frac{Z}{A}$  для данного элемента.

Если длина волны излучения  $\lambda$  приходится между краями полос поглощения  $\lambda_K$  и  $\lambda_{L_I}$  или  $\lambda_L$  и  $\lambda_{M_I}$  то полученное значение для  $\frac{\tau}{\rho}$  необходимо

умножить еще соответственно на  $\frac{\sqrt[3]{L_I}}{\sqrt[3]{K}}$  или  $\frac{\sqrt[3]{M_I}}{\sqrt[3]{L}}$ .

Указанный способ дает лишь приблизительные значения массовых коэффициентов поглощения.

Для получения массового коэффициента ослабления необходимо к  $\frac{\tau}{\rho}$  прибавить  $\frac{\sigma}{\rho}$ .

Массовый коэффициент рассеяния  $\frac{\sigma_0}{\rho}$  согласно классической теории определяется соотношением

$$\frac{\sigma_0}{\rho} = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{N}{\rho} \cdot \frac{e^4}{m^2 c^4} = 0,402 \frac{Z}{A} \approx 0,2,$$

т. е. не должен зависеть от длины волны излучения.

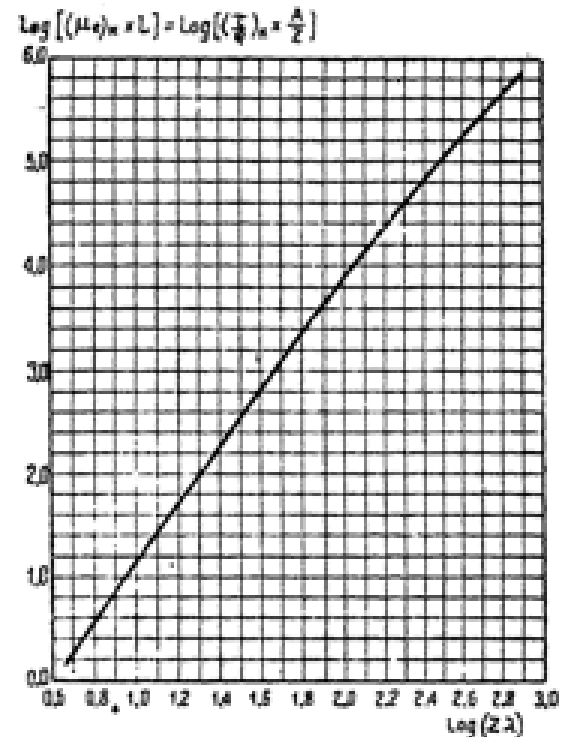


Рис. 29. Кривая Ионссона для нахождения коэффициента поглощения.

$$(\mu_e = \tau_e \text{ и } L = N)$$

необходимо

Однако это значение более или менее сохраняется лишь для элементов со сравнительно небольшим атомным номером (до  $Z = 30$ ) и длин волн, отвечающих лучам средней жесткости ( $0,2 - 0,7\text{Å}$ ).

Таблица 33

Значения массовых коэффициентов рассеяния  $\frac{\sigma}{\rho}$  для различных элементов по Кюстнеру

$\lambda$	$\frac{\sigma}{\rho}$	$Z$	$\frac{\sigma}{\rho}$
2+15	0,180	35	0,40
16	0,181	36	0,43
17	0,182	37	0,46
18	0,183	38	0,48
19	0,105	39	0,50
20	0,190	40	0,53
21	0,195	41	0,55
22	0,20	42	0,57
23	0,21	43	0,59
24	0,22	44	0,61
25	0,23	45	0,63
26	0,25	46	0,64
27	0,26	47	0,65
28	0,27	48	0,66
29	0,29	49	0,67
30	0,30	50	0,68
31	0,32	51	0,68
32	0,34	52	0,69
33	0,36	53	0,69
34	0,38	54	0,70
35	0,40	55—92	0,70

Вопрос о зависимости коэффициента рассеяния от длины волны приобретает особенное значение в области коротких длин волн, так как ослабление излучения в легких элементах происходит главным образом за счет рассеяния.

Согласно теории Комптона

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma_0}{\rho} \cdot \frac{1}{1+2\alpha},$$

где

$$\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2} = \frac{\lambda_e}{\lambda} = \frac{0,0242}{\lambda}$$

для  $\lambda$  в  $\text{Å}$

( $\lambda_e = \frac{h}{m_0c} = 0,0242\text{Å}$ ) — длина фазовой волны, отвечающей кванту энергии, эквивалентному массе покоящегося электрона).

Коэффициент рассеяния  $\frac{\sigma}{\rho}$  следует рассматривать как сумму двух коэффициентов: коэффициента отдачи  $\frac{\sigma_r}{\rho} = \frac{\sigma_0}{\rho} \cdot \frac{\alpha}{(1+2\alpha)^2}$ , определяющего энергию электронов отдачи Комpton-эффекта, и коэффициента истинного рассеяния

$$\frac{\sigma_s}{\rho} = \frac{\sigma_0}{\rho} \cdot \frac{1+\alpha}{(1+2\alpha)^2},$$

так что

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma_r}{\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho}.$$

Все перечисленные формулы справедливы лишь для  $\alpha \ll 1$ , т. е. практически для длин волн  $\lambda > 0,08\text{\AA}$ .

Таблица 34

Значений  $\frac{1+\alpha}{(1+2\alpha)^2}$  и  $\frac{\alpha}{(1+2\alpha)^2}$  для различных длин волн

$\lambda$	$\alpha$	$\frac{1}{1+2\alpha}$	$\frac{1}{(1+2\alpha)^2}$	$\frac{\alpha}{(1+2\alpha)^2}$	$\frac{1+\alpha}{(1+2\alpha)^2}$
0,08	0,302	0,622	0,388	0,117	0,505
0,10	0,242	0,675	0,454	0,110	0,564
0,12	0,202	0,712	0,501	0,105	0,606
0,14	0,173	0,742	0,551	0,095	0,646
0,16	0,151	0,768	0,590	0,089	0,679
0,18	0,134	0,790	0,623	0,084	0,707
0,20	0,121	0,803	0,646	0,078	0,724
0,24	0,101	0,833	0,690	0,071	0,761
0,30	0,081	0,860	0,740	0,060	0,800
0,40	0,060	0,894	0,800	0,047	0,847
0,50	0,048	0,913	0,830	0,041	0,871
0,60	0,040	0,925	0,855	0,035	0,890
0,70	0,035	0,935	0,872	0,031	0,903
0,8	0,030	0,944	0,890	0,027	0,917
0,9	0,027	0,950	0,900	0,025	0,925
1,0	0,024	0,954	0,910	0,022	0,932
1,5	0,016	0,965	0,932	0,016	0,948
2,0	0,012	0,974	0,950	0,012	0,962

Для лучей более коротких длин волн следует пользоваться более точной для этой области формулой Клейн-Нишина:

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{3}{4} \frac{\sigma_0}{\rho} \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\}.$$

## § 4. Качество излучения

Качество однородного излучения характеризуется длиной волны.

Однородное излучение может быть выделено из смешанного путем отражения от кристалла.

Согласно Брэггов

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

где  $n = 1, 2, 3$  — порядок отражения и

$d$  — постоянная решетки кристалла (см. спектрографы).

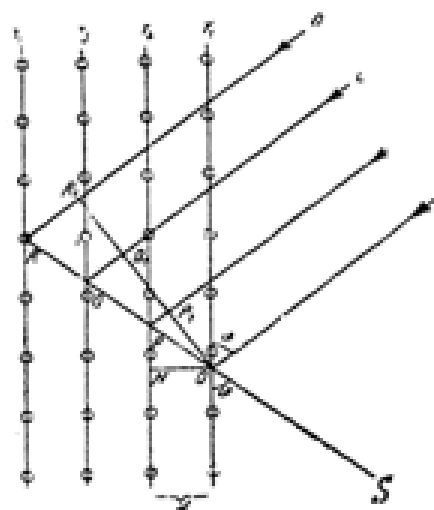


Рис. 30. Схема отражения рентгеновских лучей от сетчатой плоскости кристалла

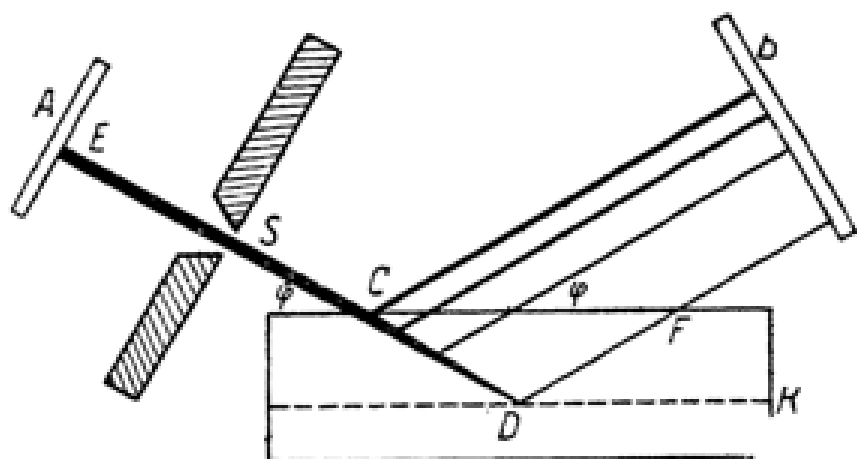


Рис. 31. Схема действия спектрографа.

Этим же путем смешанное излучение может быть разложено в спектр. Длина волн однородного излучения может быть найдена путем определения коэффициента ослабления узкого пучка лучей в какой-либо известной среде (Cu, Al, zellon, H<sub>2</sub>O). (Рис. 33).

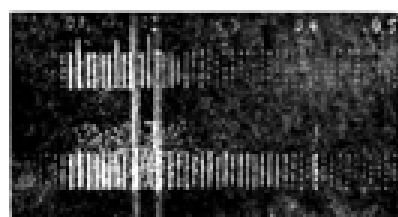


Рис. 32 Общий вид спектрограммы. Сверху — фильтрованное излучение.

Анализ качества неоднородного излучения может быть произведен также путем фильтрации лучей какой-либо средой.

Вследствие значительного поглощения мягких компонентов спектра, качество смешанного излучения непрерывно изменяется по мере проникновения лучей в среду (фильтрация излучения).

В этом случае вводится понятие „эффективной длины волн“, под которым подразумевается длина волны такого однородного излучения, которое в данном слое среды претерпевает такое же ослабление, как и действительное неоднородное излучение:

$$e^{-\mu_{eff} \cdot x} \cdot \int_{\lambda_0}^{\infty} Y_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\infty} Y_{\lambda} \cdot e^{-\mu_{\lambda} \cdot x} \cdot d\lambda.$$

Определение  $\mu_{eff}$  производится путем измерения слоя половинного ослабления  $\Delta$ , (HWS) под которым подразумевается толщина слоя поглощающей среды, ослабляющая интенсивность излучения в два раза.



Так как  $I = I_0 e^{-\mu_{eff} x}$ , то по определению

$$\ln \frac{I_0}{I} \approx \ln \frac{P_0}{P} = \ln 2 = \mu_{eff} \Delta$$

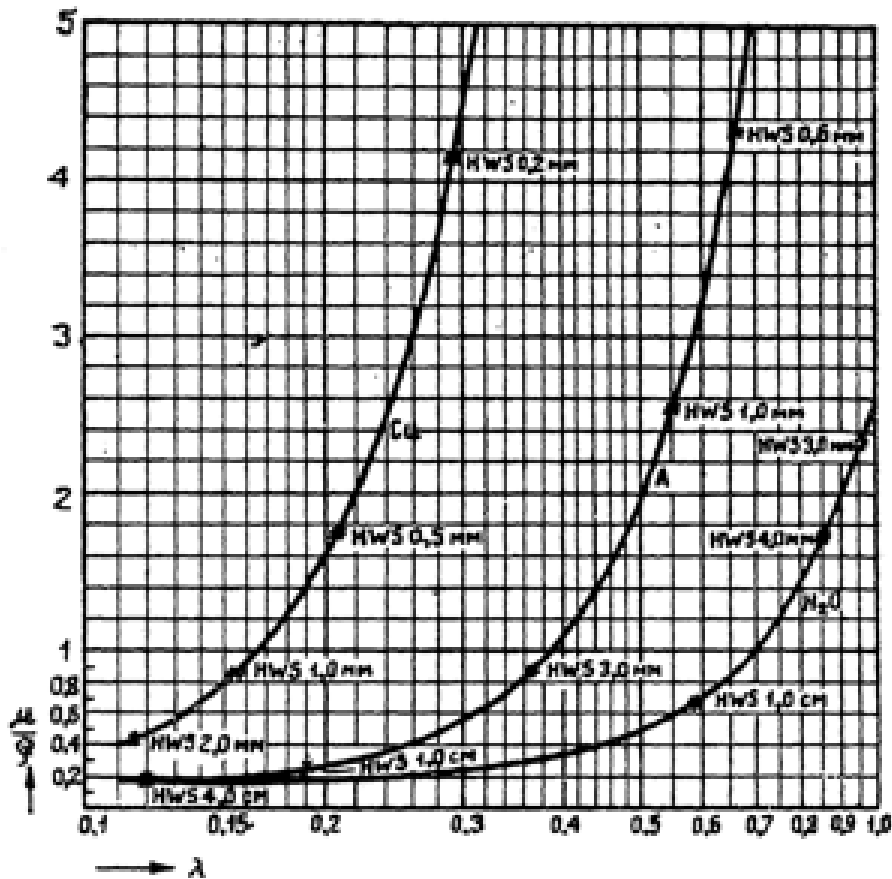


Рис. 33. Значение массового коэффициента ослабления в зависимости от длины волны для  $^{64}\text{Cu}$ , Al,  $\text{H}_2\text{O}$ . суказанием HWS

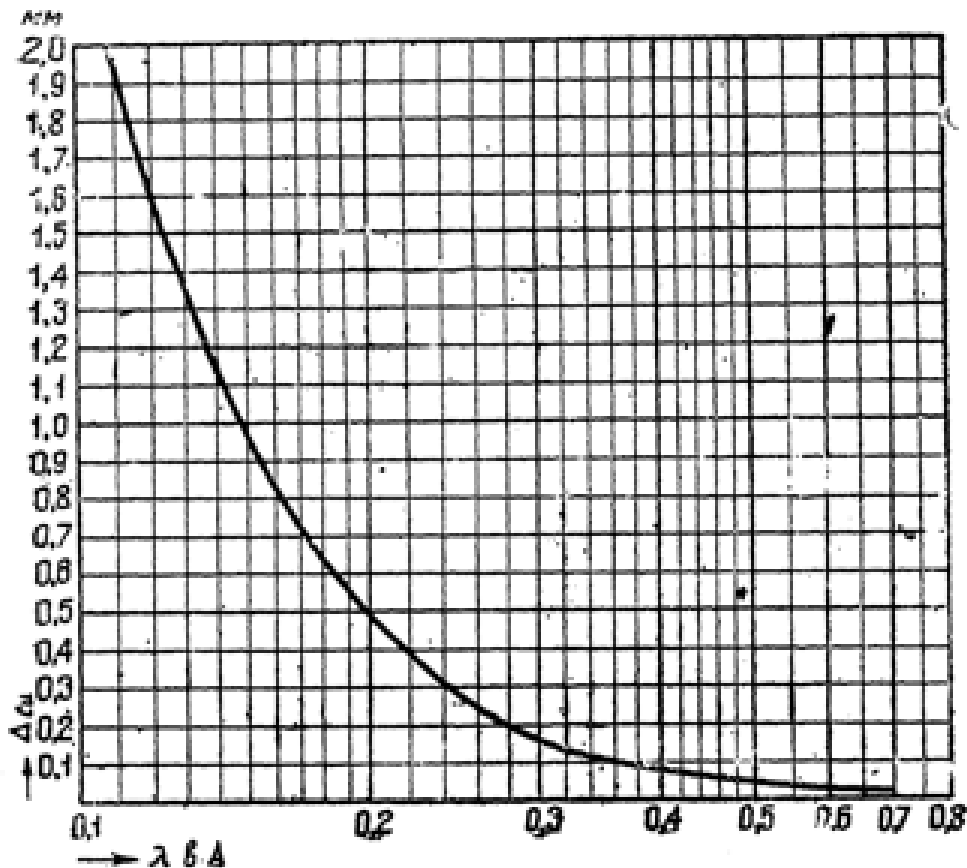


Рис. 34. Зависимость слоя половинного ослабления в меди от эффективной длины смешанного излучения.

$$\mu_{eff} = \frac{0,693}{\Delta} (\Delta \text{ — в см.})$$

Здесь  $\mu_{eff}$  и  $\Delta$  относятся к одному и тому же материалу фильтра.

Таблица 35

Значения слоя половинного ослабления  $\Delta$  для различных материалов, по Зигбану, в мм

$\lambda$ в Å	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0
Воздух (760 мм) . . .	—	—	—	7230	3500	1950	690	327
Вода . . . . .	40	33	19,2	9,6	4,8	2,5	0,79	0,34
Графит . . . . .	21	17,5	12,5	7,6	4,3	2,4	0,82	0,36
Алюминий . . . . .	15	9,8	2,4	0,79	0,35	0,18	0,056	0,024
Медь . . . . .	—	0,51	0,078	0,025	0,011	0,0055	—	—
Серебро . . . . .	0,66	0,11	0,017	0,034	0,015	0,0081	0,0026	0,0011
Свинец . . . . .	0,37	0,15	0,018	0,005	—	—	—	—

$\lambda$ в Å	2,5	3,0	4	5	6	8	10
Воздух (760 мм) . . .	180	112	53,0	29,0	18,4	8,7	4,8
Вода . . . . .	0,175	0,10	0,045	0,023	0,014	0,0056	0,0013
Графит . . . . .	0,19	0,11	0,051	0,027	0,017	0,0074	0,0040
Алюминий . . . . .	0,012	0,0072	0,0031	0,0016	0,00093	—	—
Медь . . . . .	—	—	—	—	—	—	—
Серебро . . . . .	0,0059	0,0035	—	—	—	—	—
Свинец . . . . .	—	—	—	—	—	—	—

Лучи в данной среде называются практически однородными, если  $\mu_{eff} = \text{const.}$

Степень неоднородности (т. е. число октав, присутствующих в спектре) и распределение плотности интенсивности по спектру зависят от формы кривой напряжения генерирования и фильтра.

Слой половинного ослабления  $\Delta$  однозначно характеризует смешанное излучение лишь в тех случаях, когда степень неоднородности сравниваемых излучений одинакова.

Отношения толщин фильтров из различных материалов, ослабляющих в одинаковой мере интенсивность излучения, могут быть найдены из соотношения

$$\mu_1 \delta_1 = \mu_2 \delta_2,$$

откуда

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1},$$

где  $\frac{\mu_2}{\rho_2}$  и  $\frac{\mu_1}{\rho_1}$  массовые эффективные коэффициенты ослабления,

Качество смешанного излучения для практических целей вполне определяется напряжением  $U$ , фильтром  $\delta$  и слоем половинного ослабления  $\Delta$ .

За меру неоднородности принимают число октав  $n$  колебаний, присутствующих в спектре

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_0} = 2^n.$$

Для неизменной формы кривой напряжения это соотношение равносильно заданию

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_0} = \omega.$$

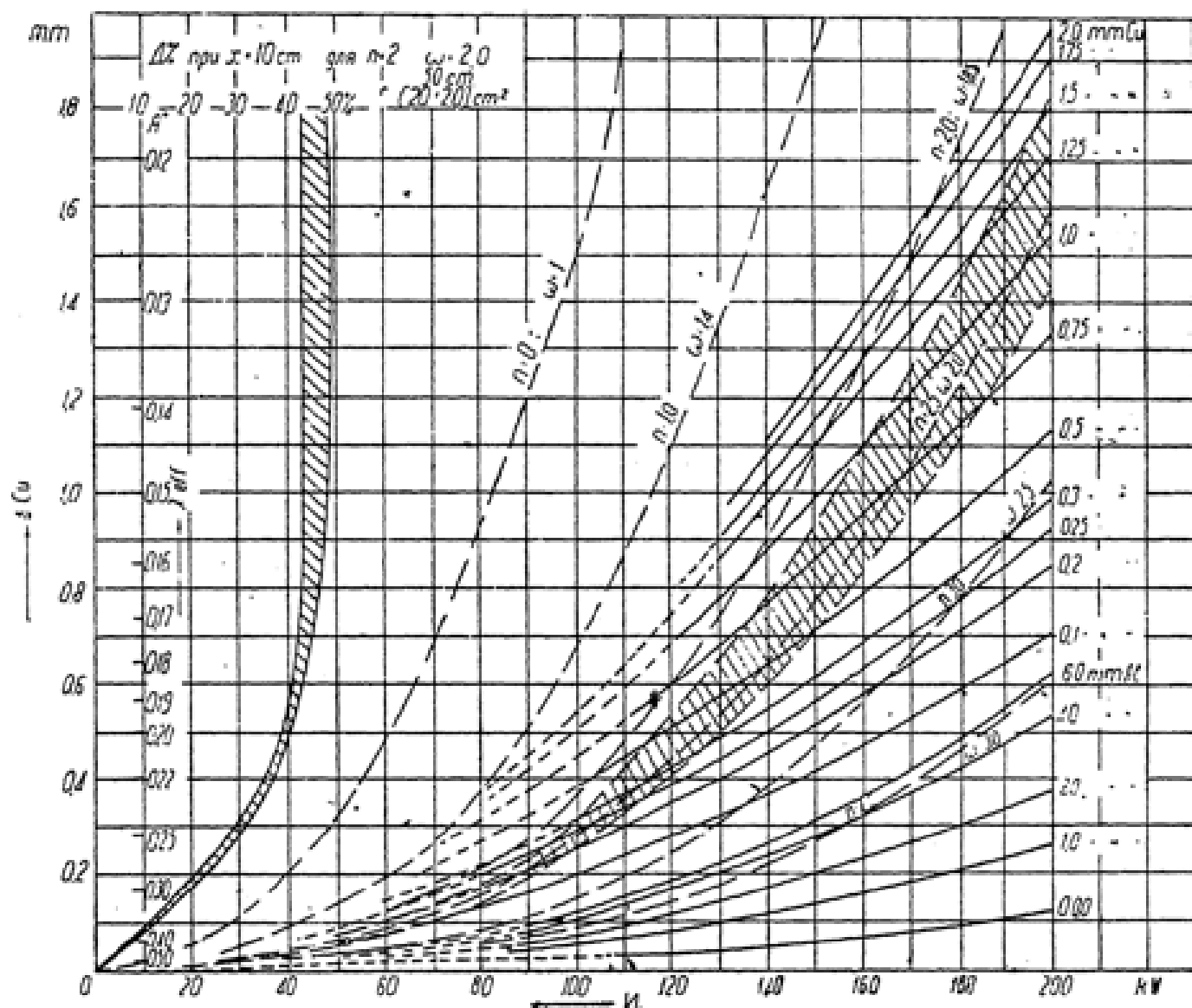


Рис. 35. Качественная диаграмма излучений для различных фильтраций Cu при постоянном напряжении генерирования,  $n$  — число присутствующих в спектре октав:  $\omega = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_0}$ . Заштрихованная часть отвечает фильтрации необходимой для получения достаточной степени однородности излучения в биологической среде. Слева приведен ход изменения процентной дозы в воде на глубине  $x = 10$  мм для такого рода излучения при фокусном расстоянии  $f = 50$  см и поле освещения  $s = (20 \times 20)$  см<sup>2</sup>.

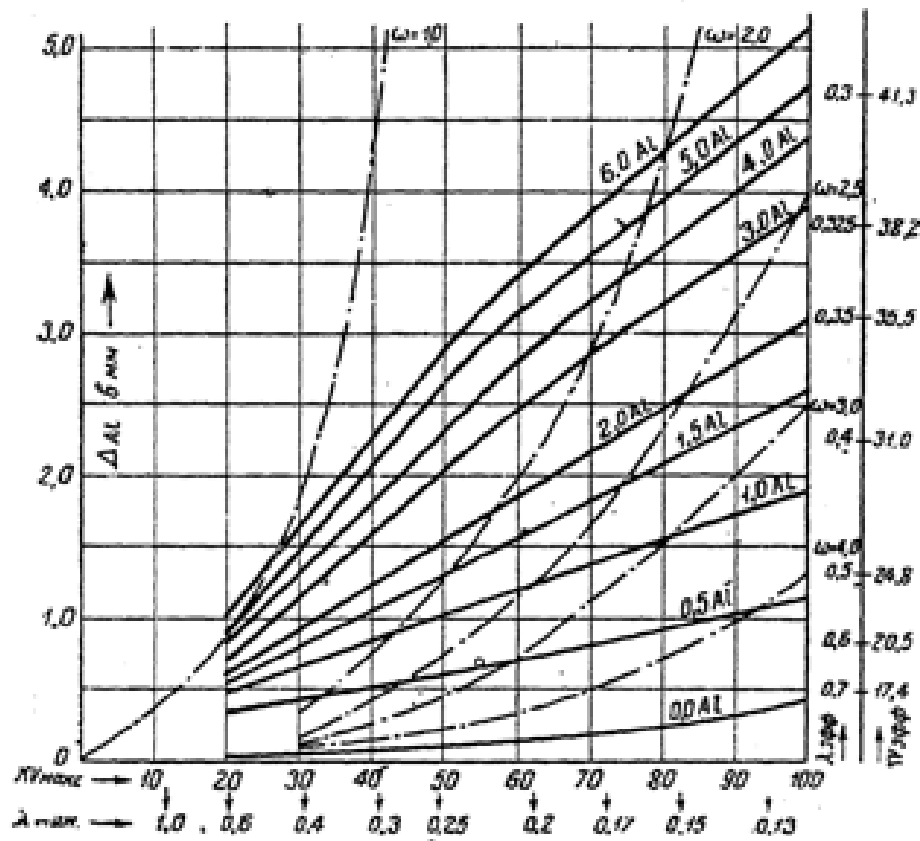


Рис. 36. Качественная диаграмма излучений для различных фильтраций Al (эквивалентная толщина стенки трубки 1,0 мм Al).

Таблица 35а

$\lambda = 0,01 - 0,25$

Слой половинного ослабления

$\lambda$ в Å	H <sub>2</sub> O мм	Al мм	Cu мм	Pb мм
0,01	—	—	5,92	0,546
0,02	—	—	5,69	0,501
0,03	—	—	5,45	0,460
0,04	—	—	5,02	0,419
0,05	—	—	4,70	0,377
0,06	—	—	4,32	0,335
0,07	—	—	3,88	0,290
0,08	—	18,0	3,25	0,246
0,09	45,4	16,8	2,78	0,205
0,10	43,1	15,6	2,35	0,171
0,11	41,6	15,1	2,01	0,141
0,12	40,3	14,6	1,73	0,117
0,13	39,2	14,0	1,47	0,097
0,14	38,3	13,7	1,26	0,081
0,15	37,4	13,0	1,09	0,267
0,16	36,6	12,3	0,94	0,232
0,17	35,9	11,6	0,80	0,201
0,18	35,2	11,0	0,70	0,175
0,19	34,5	10,3	0,61	0,154
0,20	34,0	9,71	0,53	0,137
0,21	33,4	9,13	0,47	0,122
0,22	32,8	8,57	0,41	0,107
0,23	32,3	8,00	0,36	0,094
0,24	31,6	7,46	0,32	0,084
0,25	30,9	6,96	0,29	0,075

$\lambda$ в Å	H <sub>2</sub> O м.м	Al м.м	Cu м.м	Pb м.м
0,26	30,2	6,45	0,26	0,067
0,27	29,5	5,94	0,23	0,060
0,28	28,8	5,50	0,21	0,054
0,29	28,1	5,09	0,19	0,048
0,30	27,3	4,72	0,17	0,044
0,31	26,5	4,40	0,16	0,040
0,32	25,8	4,11	0,14	0,036
0,33	25,0	3,83	0,13	0,033
0,34	24,2	3,57	0,12	0,030
0,35	23,4	3,32	0,11	0,028
0,36	22,7	3,10	0,10	0,026
0,37	21,9	2,90	0,0951	0,024
0,38	21,2	2,72	0,0881	0,022
0,39	20,5	2,54	0,0818	0,021
0,40	19,7	2,39	0,0760	0,019
0,41	19,0	2,24	0,0709	0,018
0,42	18,4	2,10	0,0663	0,016
0,43	17,7	1,98	0,0622	0,012
0,44	17,1	1,86	0,0585	0,014
0,45	16,5	1,76	0,0552	0,013
0,46	15,9	1,66	0,0521	0,0125
0,47	15,3	1,57	0,0492	0,0117
0,48	14,8	1,49	0,0468	0,0111
0,49	14,3	1,41	0,0441	0,0105
0,50	13,8	1,33	0,0415	0,00997
0,51	13,4	1,25	0,0392	0,0095
0,52	12,9	1,19	0,0370	0,0090
0,53	12,5	1,13	0,0351	0,0086
0,54	12,1	1,07	0,0332	0,0082
0,55	11,7	1,02	0,0315	0,0079
0,56	11,3	0,97	0,0299	0,0076
0,57	10,9	0,92	0,0284	0,0073
0,58	10,6	0,88	0,0270	0,0070
0,59	10,2	0,84	0,0257	0,0067
0,60	9,85	0,80	0,0244	0,0065
0,61	9,48	0,76	0,0232	0,0063
0,62	9,12	0,73	0,0222	0,0061
0,63	8,76	0,69	0,0211	0,0059
0,64	8,41	0,66	0,0202	0,0057
0,65	8,08	0,64	0,0193	0,0055
0,66	7,77	0,61	0,0184	0,0053
0,67	7,48	0,58	0,0176	0,0051
0,68	7,20	0,56	0,0169	0,0049
0,69	6,94	0,54	0,0162	0,0047
0,70	6,70	0,51	0,0155	0,0045
0,71	6,46	0,49	0,0148	0,0044
0,72	6,23	0,47	0,0142	0,0042
0,73	6,00	0,46	0,0136	0,0041
0,74	5,79	0,44	0,0131	0,0039
0,75	5,58	0,42	0,0126	0,0038

Таблица 355  
Слой половинного ослабления в меди как функция постоянного напряжения и фильтра при аноде W

Толщина фильтра Cu в м.м	kV												
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
0,1	0,23	0,26	0,30	0,34	0,39	0,44	0,49	0,55	0,61	0,68	0,75	0,82	0,89
0,2	0,27	0,31	0,36	0,41	0,46	0,51	0,57	0,63	0,70	0,77	0,85	0,92	1,00
0,3	0,32	0,37	0,43	0,47	0,52	0,58	0,64	0,71	0,78	0,86	0,94	1,02	1,11
0,4	0,37	0,42	0,47	0,52	0,58	0,65	0,71	0,79	0,86	0,95	1,03	1,12	1,22
0,5	0,41	0,46	0,51	0,57	0,64	0,72	0,78	0,87	0,94	1,04	1,12	1,22	1,33
0,6	0,44	0,50	0,56	0,63	0,70	0,78	0,85	0,95	1,02	1,13	1,22	1,32	1,43
0,7	0,48	0,54	0,60	0,68	0,75	0,84	0,92	1,02	1,10	1,22	1,31	1,42	1,53
0,8	0,51	0,58	0,64	0,73	0,80	0,90	0,99	1,09	1,18	1,30	1,40	1,51	1,62
0,9	0,51	0,31	0,68	0,77	0,85	0,95	1,05	1,16	1,25	1,38	1,48	1,60	1,71
1,0	0,56	0,64	0,72	0,81	0,89	1,00	1,10	1,21	1,32	1,45	1,56	1,68	1,80
1,1	0,59	0,67	0,75	0,84	0,93	1,05	1,15	1,26	1,38	1,50	1,62	1,75	1,87
1,2	0,62	0,70	0,78	0,87	0,97	1,07	1,19	1,31	1,43	1,55	1,67	1,81	1,93
1,3	0,63	0,72	0,81	0,90	1,00	1,11	1,23	1,35	1,47	1,60	1,73	1,86	1,99
1,4	0,64	0,74	0,83	0,93	1,03	1,14	1,26	1,39	1,51	1,64	1,77	1,90	2,03
1,5	0,65	0,75	0,85	0,95	1,06	1,4	1,29	1,42	1,53	1,67	1,80	1,93	2,06
1,6	0,66	0,76	0,86	0,97	1,08	1,19	1,31	1,44	1,55	1,69	1,83	1,96	2,09
1,7	0,67	0,77	0,87	0,98	1,09	1,20	1,33	1,46	1,57	1,71	1,85	1,99	2,12
1,8	0,68	0,78	0,88	0,99	1,10	1,22	1,35	1,48	1,59	1,73	1,87	2,01	2,15
1,9	0,69	0,79	0,89	1,00	1,11	1,23	1,36	1,49	1,61	1,75	1,89	2,03	2,17
2,0	0,70	0,80	0,90	1,01	1,12	1,24	1,37	1,50	1,63	1,77	1,91	2,05	2,19

Ослабление смешанного пучка рентгеновских лучей в целлоне (а) и воде (б) по Кюстнеру в %

U в kV	Толщина слоя в мм									
	0		1		2		3		4	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
11	100	100	31	38	12	17	6	8	5	6
10	100	100	27	36	9	14	4	6	3	4
9	100	100	22	30	6	10	3	4	2	3
8	100	100	17	23	3	6	1	2	0,5	1
7	100	100	10	16	1	2	—	—	—	—

## § 5. Действие рентгеновских лучей

Первичным действием при поглощении рентгеновских лучей является преобразование квант лучистой энергии в энергию электронов (фотоэлектронов и электронов отдачи).

Это преобразование энергии определяется массовым коэффициентом электронного преобразования

$$\frac{\gamma}{\rho} = k \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_r}{\rho},$$

где  $k = 1$  вдали от границ поглощения и

$k < 1$  вблизи края полосы поглощения со стороны коротких длин волн вследствие возникновения при фотоэлектрическом акте лучей флуоресценции

$$k = 1 - u_s \frac{\nu_s}{\nu} = 1 - u_s \frac{\lambda}{\lambda_s}$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны возбуждающих (падающих) лучей,  $\lambda_s$  — длина волны возбуждаемого характеристического излучения атома. Очевидно,  $\lambda < \lambda_s$ ,  $u_s$  — квантовый выход характеристического излучения, представляющий собой отношение числа возбужденных атомов, возвращающих энергию возбуждения в формы характеристического излучения  $N_s$  к общему числу возбужденных падающим излучением атомов среды  $N$ :

$$u_s = \frac{N_s}{N}.$$

Аналогично квантовый выход характеристических фотоэлектронов

$$u_e = \frac{N_e}{N}.$$

Так как

$$N_s + N_e = N,$$

то

$$u_s + u_e = 1.$$

Энергетический выход характеристического излучения

$$r_s = \frac{N_s}{N} \cdot \frac{h\nu_s}{h\nu} = u_s \frac{\nu_s}{\nu}.$$

Часть поглощенной энергии, перешедшая в форму кинетической энергии электронов, будет очевидно

$$N \cdot h\nu (1 - r_s) = I_e \left(1 - u_s \frac{\lambda}{\lambda_s}\right).$$

По Смекалу для элементов

$$\text{с. } Z \gg 18 \quad u_e = 1 - u_s = \frac{16,2}{Z - 1}.$$

По Мертину для элементов с  $Z > 21$

$$u_e = \left(\frac{21}{Z}\right)^2.$$

По Вентцелю и Фусу

$$\frac{u_e}{u_s} = 10^6 \cdot Z^{-4}.$$

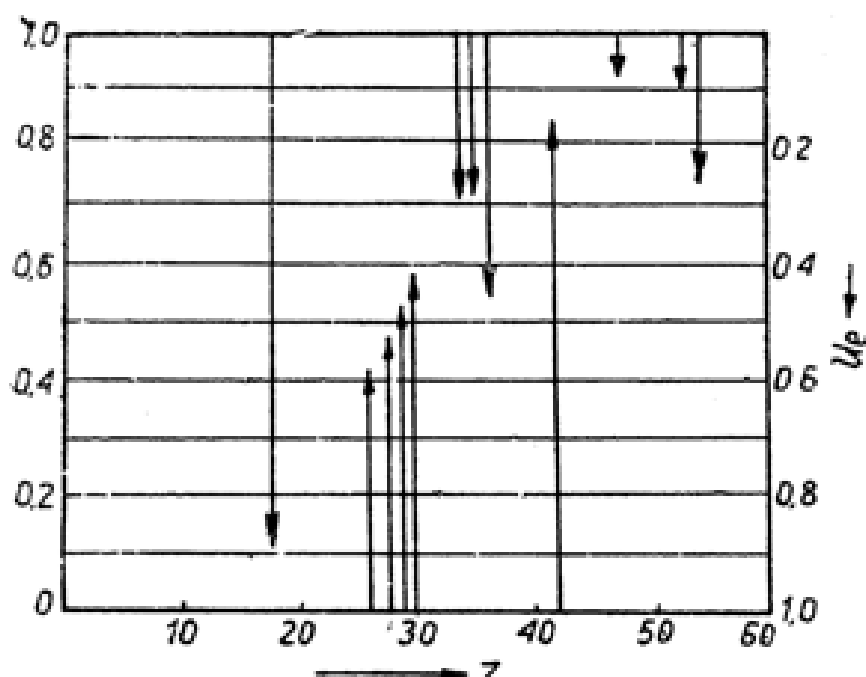


Рис. 37. Квантовый выход характеристического излучения ( $U_s$ ) и характеристической эмиссии электронов ( $U_e$ ) в зависимости от атомного номера элемента.

Многообразие вторичных проявлений рентгеновского излучения можно объединить в пять видов действия: тепловое, ионизационное, световозбуждающее, фотохимическое и биологическое.

Вообще говоря, в поглощающей среде одновременно протекает ряд вторичных процессов.

Наиболее чистую картину дает ионизационное действие в легких газах, почему оно и положено в основу энергетических измерений рентгеновских лучей.

Единица физической дозы рентгеновских лучей „рентген“ представляет собой объемную плотность поглощенной энергии рентгеновских лучей, при которой в результате полного ионизационного действия лучей в воздухе при  $0^\circ$  и 760 мм Hg отделяются заряды в одну абсолютную электрическую единицу каждый на один кубический сантиметр освещаемого объема

$$1r \approx 0,11 \frac{\text{эрг}}{\text{с.м}^3}.$$



Ионизационное действие рентгеновских лучей различных длин волн, приведенное к одинаковой интенсивности падающего излучения и одинаковому числу молекул в освещаемом объеме по отношению к воздуху

Длина волны	Воздух	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> Se	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	CH <sub>3</sub> J
2,29	1	—	—	1,40	—	—	—	—	—	—
1,93	1	—	1,37	1,41	1,32	14,7	—	30,3	41,2	—
1,66	1	—	1,35	1,39	1,33	14,9	11,5	—	—	162
1,54	1	0,71	1,36	1,40	1,30	14,7	11,7	29,2	42	—
1,43	1	—	1,42	1,36	1,30	14,3	11,1	—	41,6	—
1,17	1	0,71	1,27	1,38	1,33	14,8	11,2	—	42,2	158
1,11	1	—	1,31	1,35	1,37	15,0	11,7	30,6	41,7	—
0,87	1	—	1,28	1,40	1,31	15,3	11,7	122	153	—
0,71	1	—	1,28	1,43	1,38	15,2	12,2	190	213	188
0,61	1	—	—	1,41	—	15,3	12,3	—	—	—
0,59	1	—	—	1,39	—	15,4	12,7	—	—	—
0,56	1	0,72	1,32	1,39	1,34	15,4	12,6	231	272	198
0,49	1	—	1,29	1,41	1,31	15,7	—	250	335	205
0,47	1	—	1,28	1,43	1,32	—	—	—	—	—
0,44	1	0,73	—	—	—	—	—	286	—	211
0,39	1	—	—	—	—	—	—	—	—	251

**Значения работы образования пары ионов в воздухе по данным различных авторов**

Год	А в т о р	Область длины волн	Ход изменения	Численная величина $V$
1926	Куленкамфер .....	0,56—2,0	постоянная	35+5
1926	Кирхнер и Шмитц (исправ- ленное) .....	0,5 —1,5	"	31
1927	Румп .....	0,13—0,5	"	33+2
1928	Штеенбек .....	1,54—2,29	"	28±6
1928	Вухмад .....	0,85—3,0	"	31±0,3
1928	Краузер .....	0,6 —0,75	"	42,5±0,3
1929	Кертнер .....	1,54	"	36,4
1929	Эйзель .....	—	"	32,2
1930	Гертзен .....	—	"	36,0
1933	Аглинцев .....	0,10—0,47	"	37,3±1,5

Таблица 38

**Расход энергии при ионизации различных газов по отношению  
к работе образования пары ионов в воздухе**

Воздух	1	Воздух	1
H <sub>2</sub>	0,98	CH <sub>3</sub> I	0,70
N <sub>2</sub>	1,07	N <sub>2</sub> O	0,98
O <sub>2</sub>	0,91	NH <sub>3</sub>	0,82
CO <sub>2</sub>	0,98	CS <sub>2</sub>	0,80
SO <sub>2</sub>	1,08	CHCl <sub>3</sub>	0,99
H <sub>2</sub> S	0,77	HCl	0,86
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	0,65	CCl <sub>4</sub>	0,93

Таблица 39

**Относительное число фотоэлектронов и электронов отдачи для лучей различных  
длины волн по Комптону и Симону**

$\lambda$ в Å	Ч и с л о		Число фотоэлектронов при одинаковой интенсивности падающего излучения
	фотоэлектронов	электронов отдачи	
0,13	1	72	0,11
0,17	4	68	0,35
0,20	8	74	0,55
0,29	12	33	1,2
0,44	11	10	2,5
0,71	49	5	13,8

Относительное число эмиссируемых фотоэлектронов на атом  $n_{At}$  по Муру  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$   
(К — серия Cu)

Элемент	Атомный вес $A$	Относительное число $n_{At}$ (для воздуха $n_{At} = 1$ )	$A^{\frac{1}{2}} \cdot 10^{-4}$	$\frac{A^{\frac{1}{2}}}{n_{At}} \cdot 10^{-4}$
C	12	0,2	2,07	10,3
N	14	0,34	3,84	11,3
O	16	0,62	6,65	10,4
S	32	10,9	104,8	9,6
Cl	35,5	14,7	158,8	10,8

Из постоянства значений последнего столбца следует:

$$n_{At} \approx kA^{\frac{1}{2}} \approx k_1 Z^{\frac{1}{2}}$$

Таблица 41

Фотоэмиссия массивных металлических пластин по Шереру

Освещаемый элемент	A.	Fe	Ni	Cu	Ag	Sn	Au	Pb	Bi
Относительное число $n^1$ эмиссируемых электронов .....	11	47	53	56	94	100	184	189	194
$Z$ .....	13	26	28	29	47	50	79	82	83

Из данных таблицы следует, что для  $Z > 10$   $n^1 \approx k(Z - 10)$

Таблица 42

Максимальные значения начальной энергии электронов отдачи по Комптону и Симону

Напряжение генерирования в кV	Толщина фильтра Cu в мм	$\lambda_{eff}$ в $\text{\AA}$	Наблюдаемая максимальная длина пробега в воздухе в мм	Наблюд. максим. начальн. энергия в e-кV	Подсчитанная начальная энергия $W_{max} = m \cdot c^2 \frac{2\alpha^2}{1+2\alpha}$
21	0	0,71	0	0	0,93
34	0,15	0,44	0	0	2,8
52	0,5	0,29	2,5	10,5	6,1
74	1,2	0,20	6	16	12
88	1,5	0,17	9	20	16
111	3,4	0,13	24	32	26

Длина пробега и начальная энергия электронов отдачи в воздухе под различными углами к первичному пучку по Комптону и Симону  $\lambda = 0,13 \text{ \AA}$

Угол эмиссии $\theta$	Средняя длина пробега в мм		Начальная энергия, подсчитанная из данных наблюдений
	Наблюдение	Подсчет	
0—30°	9	11	20
30—60°	4	4	13
60—90°	0,9	0,3	6

Таблица 44

Пространственное распределение электронов отдачи в воздухе по отношению направления первичного пучка по Комптону и Симону  $\lambda = 0,13 \text{ \AA}$

Угол эмиссии $\theta$	Число наблюдаемых начальных направлений	Число вычисленных начальных направлений
0—30	34	28
30—60°	39	50
60—90°	27	32

Таблица 45

Распределение длин пробегов электронов отдачи в воздухе по Комптону и Симону

Длина пробега в частях от максимального значения	Относительное число электронов отдачи, имеющих указанную длину пробега в % при длинах волн излучения в $\text{\AA}$				Среднее	Вычисления по квантовой теории
	0,29	0,20	0,17	0,13		
0—0,2	44	66	60	54	56	53
0,2—0,4	34	20	26	32	28	22
0,4—0,6	19	8	4	8	10	14
0,6—0,8	0	3	5	3	3	8
0,8—1,0	3	3	5	3	3	3

Относительное число электронов отдачи  $N_r$  и фотоэлектронов  $N_p$  в воздухе для различных длин волн излучения по Комптону и Симону

$\lambda_{eff}$ в $\text{Å}$	Число электронов отдачи $N_r$	Число фотоэлектронов $N_p$	$\frac{N_r}{N_p}$	$\frac{\sigma}{\tau}$
0,71	5	49	0,1	0,27
0,44	10	11	0,9	1,2
0,29	33	12	2,7	3,8
0,20	74	8	9	10
0,17	68	4	17	17
0,13	(72)	(1)	(72)	32

Таблица 47

Относительное число электронов отдачи фотоэлектронов в различных газах по Наттелю и Вильямсу

Рассеивающий газ	$\lambda$ в $\text{Å}$	Число электронов отдачи $N_r$	Число фотоэлектронов $N_p$	$\frac{N_r}{N_p}$	$\frac{\sigma}{\tau}$
Кислород .....	0,709	26	205	0,127	0,174
" .....	0,614	129	608	0,212	0,268
" .....	0,545	109	358	0,305	0,383
" .....	0,614	223	722	0,309	0,400
" .....	0,545	109	202	0,540	0,572
Аргон.. .....	0,614	7	209	0,033	0,030
" .....	0,545	4	139	0,029	0,043
Воздух.....	0,57	153	454	0,337	0,372
" .....	0,35	139	83	1,67	1,57
" .....	0,2	—	—	11,0	
Водород + кислород (200 : 2,3)	0,614	28	11	2,5	2,9
Водород + кислород (200 : 1,47)	0,614	73	21	3,5	4,4

Число и энергия электронов при общем поглощении  $1 \text{ r} = 0,11 \text{ эрг/см}^2$  в воздухе

$\lambda$ Å	$\frac{\tau}{\rho}$	$\frac{\sigma_T}{\rho}$	$\frac{\sigma_S}{\rho}$	$\frac{\sigma}{\rho}$	$\frac{\mu}{\rho}$	$\frac{\gamma}{\rho}$	Распределение энергии		Число электронов			Энергия на каждый электрон	
							Фото-электр. $W_p$ в эргах	Электр. отдачи $W_T$ в эргах	отто	Отдач.	Всего	Фото	Отдач.
							в эргах	в эргах	$N_p$	$N_T$	$N$	$\times 10^6$	$\times 10^6$
0,1	0,005 <sup>1</sup>	0,022	0,113	0,135	0,140	0,027	0,0204	0,0896	$0,104 \cdot 10^6$	$2,81 \cdot 10^6$	$2,91 \cdot 10^6$	19,7	3,19
0,15	0,012 <sup>1</sup>	0,020	0,132	0,152	0,164	0,032	0,0419	0,068	$0,320 \cdot 10^6$	$4,06 \cdot 10^6$	$4,38 \cdot 10^6$	13,05	1,68
0,2	0,020 <sup>1</sup>	0,016	0,145	0,161	0,164	0,036	0,0625	0,0475	$0,635 \cdot 10^6$	$4,89 \cdot 10^6$	$5,52 \cdot 10^6$	9,8	0,973
0,25	0,037 <sup>1</sup>	0,014	0,154	0,168	0,205	0,051	0,0800	0,030	$1,02 \cdot 10^6$	$4,64 \cdot 10^6$	$5,66 \cdot 10^6$	7,84	0,647
0,3	0,058 <sup>1</sup>	0,012	0,162	0,173	0,231	0,070	0,0924	0,0176	$1,41 \cdot 10^6$	$4,20 \cdot 10^6$	$5,61 \cdot 10^6$	6,53	0,419
0,4	0,145 <sup>1</sup>	0,009	0,171	0,180	0,325	0,154	0,1035	0,0065	$2,11 \cdot 10^6$	$2,61 \cdot 10^6$	$4,72 \cdot 10^6$	4,9	0,249
0,5	0,30	0,008	0,175	0,183	0,43	0,308	0,1072	0,0028	$2,72 \cdot 10^6$	$1,66 \cdot 10^6$	$4,38 \cdot 10^6$	3,94	0,169
0,6	0,56	0,0069	0,179	0,186	0,75	0,567	0,1086	0,00143	$3,31 \cdot 10^6$	$1,09 \cdot 10^6$	$4,40 \cdot 10^6$	3,28	0,131
0,7	1,01	0,006	0,182	0,188	1,20	1,016	0,1094	0,0006	$3,90 \cdot 10^6$	$0,725 \cdot 10^6$	$4,625 \cdot 10^6$	2,80	0,083
0,8	1,41	0,0016	0,186	0,191	1,60	1,415	0,1096	0,0004	$4,47 \cdot 10^6$	$0,607 \cdot 10^6$	$5,08 \cdot 10^6$	2,46	0,072
0,9	1,91	0,0042	0,189	0,193	2,1	1,914	0,1098	0,0002	$5,04 \cdot 10^6$	$0,51 \cdot 10^6$	$5,55 \cdot 10^6$	2,13	0,051
1,0	2,4	0,004	0,192	0,196	2,6	2,404	0,1099	0,0001	$5,6 \cdot 10^6$	$0,46 \cdot 10^6$	$6,06 \cdot 10^6$	1,96	0,03
1,5	8,5	0,003	0,197	0,200	8,7	8,503	0,10996	0,00004	$8,4 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^6$	1,3	0,022
2,0	20,8	0,0023	0,198	0,200	21	20,802	0,10999	0,00001	$11,2 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$	$11,3 \cdot 10^6$	0,98	0,011

<sup>1</sup> Подсчет значений  $\frac{\tau}{\rho}$  для O и C по Ольсону. Olson N., Derham E., Storeh H., Phys. Rev. 21, 1923. Landolt-Bornstein, Erg-Bd, 1927.

Скорости электронов в kV и практическая длина свободного пробега электронов в сантиметрах для воздуха  $R_L$  и воды  $R_w$

kV	$\beta = \frac{v}{c}$	$R_L$	$R_w$
10	0,198	0,193	0,00025
12	0,214	0,26	0,000336
15	0,230	0,29	0,000375
20	0,265	0,51	0,000664
25	0,298	0,90	0,00117
30	0,326	1,3	0,00169
35	0,347	1,8	0,00232
40	0,380	2,6	0,00341
70	0,475	5,4	0,0070
85	0,512	7,3	0,0095
90	0,524	8,4	0,0 08
150	0,632	14	0,018
270	0,752	49	0,064
400	0,831	96	0,124

Следующим технически важным действием рентгеновских лучей является фотохимический процесс в форме почернения фотографической пленки.

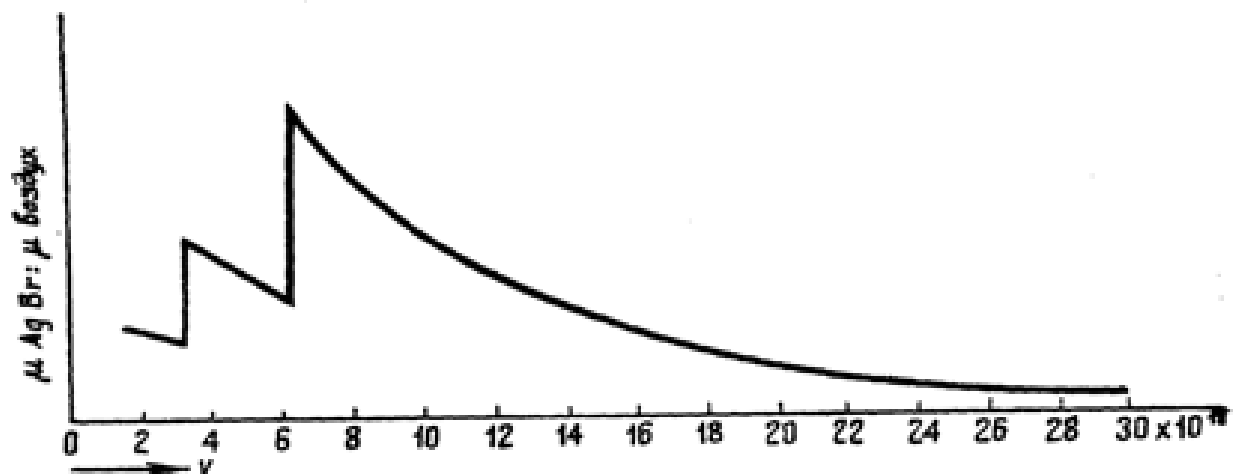


Рис. 38. Ход изменения отношения коэффициента ослабления фото-пленки к коэффициенту ослабления воздуха, в зависимости от частоты колебаний.

Для измерительных целей это действие представляет затруднения в виду наличия границы полосы поглощения в рабочем участке спектра

$$\text{Br } \lambda_k = 0,915\text{\AA} \quad \text{и} \quad \lambda_L = 7,000\text{\AA},$$

$$\text{Ag } \lambda_k = 0,484\text{\AA} \quad \text{и} \quad \lambda_L = 3,260\text{\AA}.$$

Плотность почернения фотопленок, представляющая собой десятичный логарифм отношения интенсивности падающих на фотопленку видимых лучей к интенсивности прошедших через нее лучей,  $S = \lg \frac{I_0}{I}$ , зависит от ряда

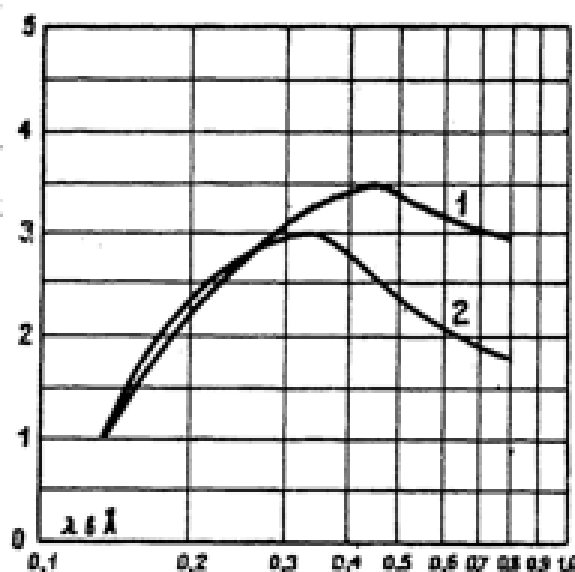


Рис. 38а. Отношение коэффициентов ослабления фотопленки к целлолу (1) и почернение фотопленки к ионизационному току в воздухе (2) в зависимости от эффективной длины излучения.

факторов: от качества излучения, от экспозиции (энергии излучения, упавшей на фотопленку), от рода фотопленки и фактора проявления

При прочих одинаковых условиях плотность почернения пропорциональна энергии излучения лишь для плотностей почернений:  $S < 1,5$ .

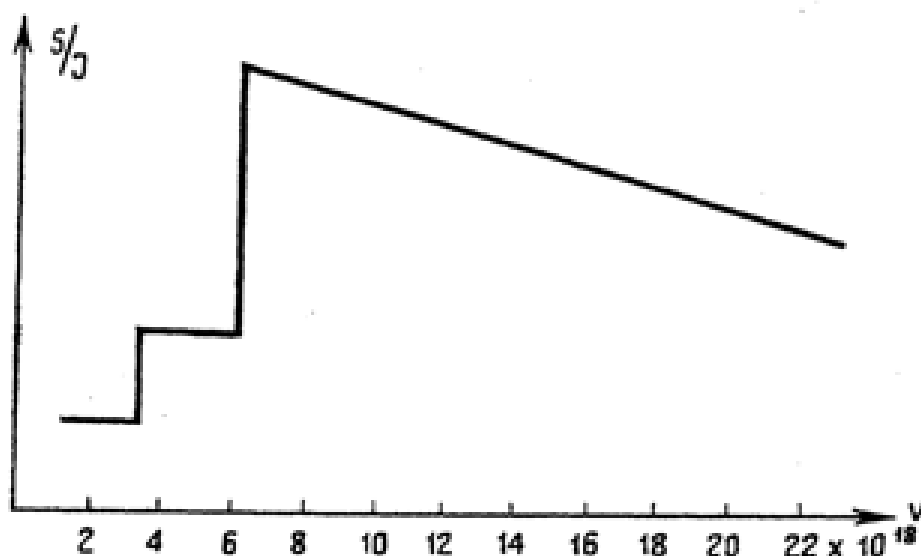


Рис. 39. Отношение плотности почернения к ионизационному току в зависимости от частоты колебаний.

По причинам зависимости плотности почернения от качества фотопленок все нижеприводимые данные могут иметь лишь ориентировочный характер.



Число рентгенов в воздухе, необходимое для почернения фотопленки до  $S = 0,5$  побозерсу и Тууку

Постоянное напряжение в kV	Фильтр		
	1 mm Pb + 1 mm Cu + 1 mm Al	1 mm Cu + 1 mm Al	1 mm Al

(1927) Агфа Лауэ фильм

190	0,120	0,052	0,026
180	0,100	0,048	0,024
160	0,080	0,040	0,020
140	0,065	0,030	0,018
120	0,050	0,026	0,018
100	0,040	0,021	0,017
80	0,030	0,018	0,016
65	—	—	0,025
50	—	—	0,021
35	—	—	0,021

(1929) Агфа-фильм двойная

180	0,090	0,060	0,030
160	—	0,050	—
140	0,055	0,040	0,025
120	—	0,030	—
100	0,035	0,025	0,022
65	—	—	0,030
50	—	—	0,025
35	—	—	0,025

Таблица 51

Число рентгенов в воздухе, необходимое для почернения фотопластины до  $S = 1,0$  при выполнении снимков с усиливающими экранами, по Аглинцеву

Постоянное напряжение в kV	Фильтры mm Pb						
	—	0,7	1,4	2,0	2,2	2,5	2,7
75	0,10	0,15	0,17	—	—	—	—
85	—	—	0,16	—	0,13	—	0,15
100	—	—	0,10	0,08	—	0,09	—
125	—	—	—	0,10	—	0,13	—

В среднем для обычных рентгеновских фотопластинок при работе с двумя усиливающими экранами в широких границах качеств излучения мощностей физических доз от  $P = 10^{-5}$  r/sec до  $P = 6 \cdot 10^{-3}$  r/sec можно считать,

что плотности почернения  $S = 1$  отвечает физическая доза в воздухе  $D = 0,12 r$  с колебаниями в ту и другую сторону на  $\pm 50\%$ , вследствие индивидуальных отличий пленок и различий факторов проявления.

Таблица 51а

Сводные данные зависимости плотности почернения фотопленки от числа рентгенов в воздухе по различным источникам

Плотность почернения $S$	Число рентгенов (г.)			
	Боуэрс Туук	Нееф	Франке	Жегалкин
0,5	0,016—0,120	0,25—0,75	0,005—1,0	0,05—0,12
1,0	—	1—2	1,25	0,10—0,30
1,5	—	2—3	—	0,25—0,60

Несмотря на трудности и невысокую точность количественной оценки излучения по почернению фотопленки, фотографический метод нашел широкое применение в спектральном и структурном анализе по следующим причинам:

1) возможность применения к пучкам весьма малого поперечного сечения и слабым интенсивностям,

2) документальность полученных результатов,

3) практическая необходимость лишь в относительных суждениях о почернениях.

При фотографических снимках в медицине и технике каких-либо объектов иногда бывает выгодно применение усилительных экранов из вольфрамнокислого кальция ( $Ca \cdot W \cdot O_4$ ).

Коэффициентом усиления называется отношение времени экспозиции  $t_0$  без усиливающих экранов к времени экспозиции  $t$  с экранами, при неизменном излучении и одинаковом почернении.

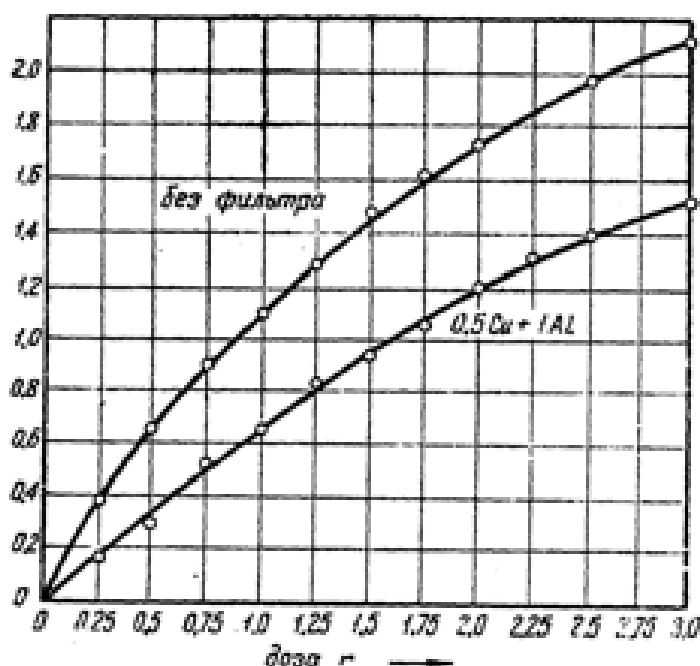


Рис. 39а. Соотношение между плотностью почернения и физической дозой в воздухе в рентгенах.

При очень слабых интенсивностях лучей и обычных фотоэмульсиях применение экранов становится бесполезным.

Для визуальных наблюдений применяются флуоресцирующие экраны из платиносиноеродистого бария



Спектральный состав видимых лучей флуоресценции не зависит от качества падающих на экран рентгеновских лучей.

Изменение окраски барий-платино-цианура, использовавшееся ранее для измерительных целей (таблетки Сабуро-Нуаре, радиометр Гольцкнехта), в сильной мере зависит от качества рентгеновского излучения.

Заметное свечение флюоресцирующих экранов начинается при мощности физической дозы в воздухе от 3 до 25  $\frac{\mu r}{\text{sec}}$  в зависимости от качества излучения и рода экрана

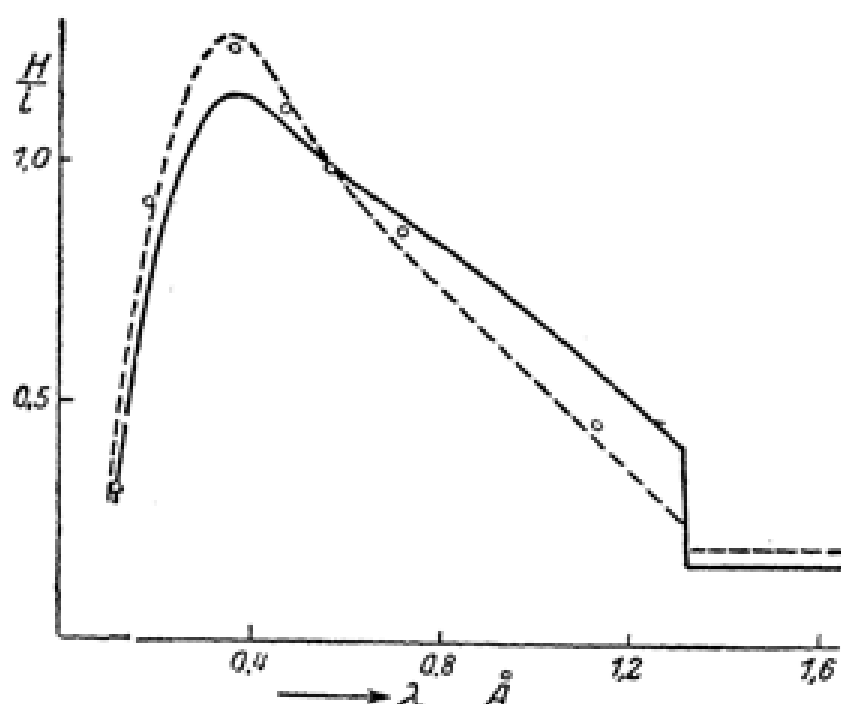


Рис. 40. Отношение яркости флюоресцирующего экрана к силе ионизационного тока в зависимости от длины волны излучения.

Аналогичный ход изменения чувствительности показывает также и селеновый приемник (изменение проводимости селена под действием лучей).

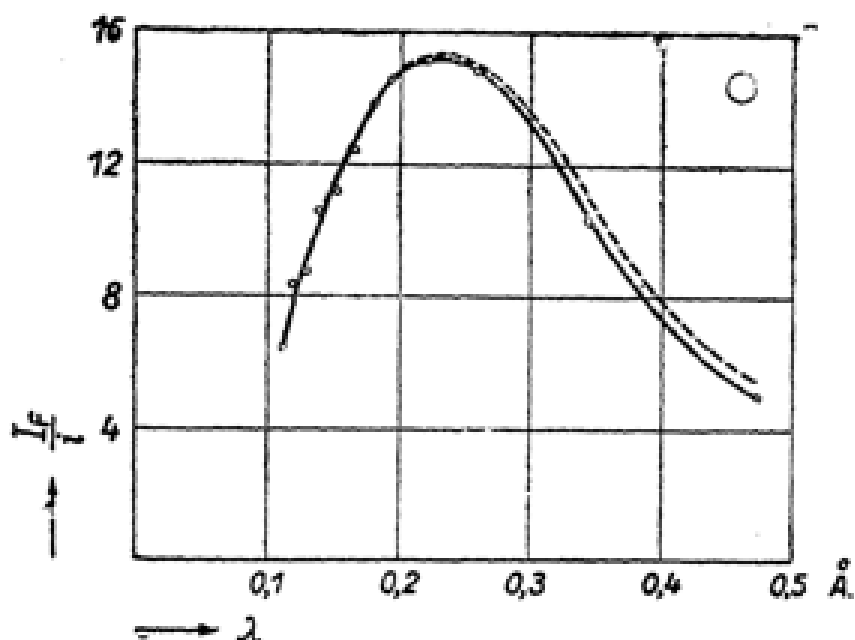


Рис. 41. Отношение показаний прибора с селеновой камерой к силе ионизационного тока в зависимости от длины волны излучения.

Зависимость показаний счетчиков Гейгер-Мюллера с различными материалами стенок от качества излучения показана на рис. 42.

Зависимость показаний ионизационных камер при освещении через стенку для различных случаев показана на рис. 13 (см. рентгенметры).

## § 6. Физическая доза и биологическое действие рентгеновских лучей

Количество поглощенной энергии излучения, отнесенное к единице освещаемого объема среды, называется физической дозой рентгеновских лучей.

Для измерительных целей в качестве среды принят атмосферный воздух, в качестве реакции — ионизационное действие лучей.

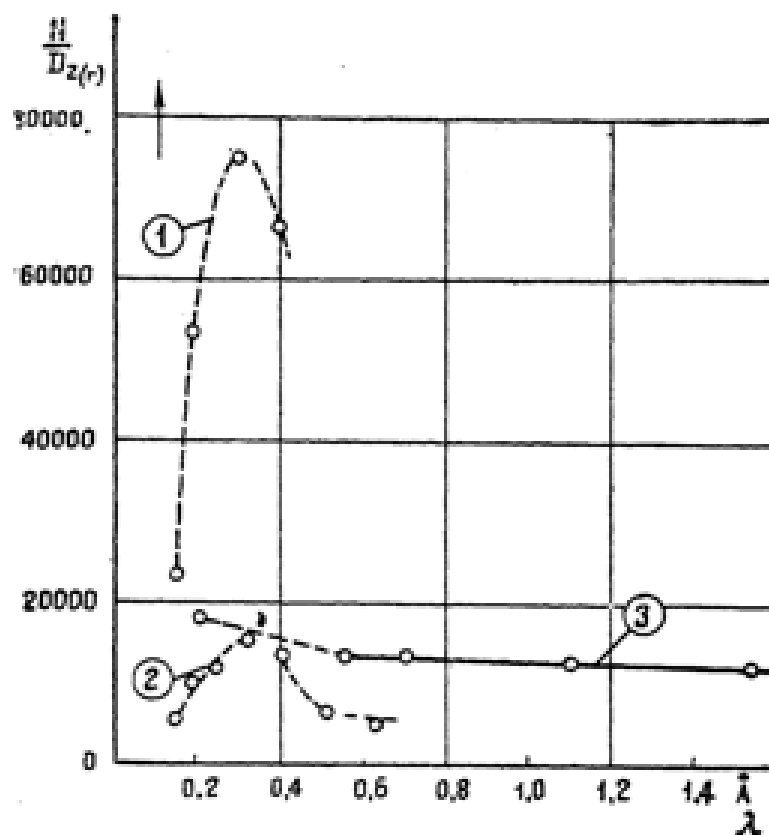


Рис. 42. Отношение числа импульсов в счетной трубке Гейгер-Мюллера к физической дозе в воздухе: 1) стенка — железо, 2) стенка — алюминий, 3) стенка из материала, эквивалентного воздуху.

нормальной плотности рентгеновские лучи того же качества и интенсивности при одинаковом времени освещения.<sup>1</sup>

При этом говорят, что некоторому числу рентгенов (в воздухе) соответствует тот или иной эффект в среде, например почернение фотопленки, изменение окраски кристалла, выпадение осадка из коллоидной смеси, эциляция или эритема кожи и так далее.

Процентной глубинной дозой  $D\%$  называют выраженное в процентах отношение физической дозы в воздухе на какой-либо глубине в среде к значению ее на поверхности освещаемой среды в направлении лучей.

Так как физическая доза зависит от времени освещения, то для количественной оценки излучения необходимо введение понятия мощности физической дозы.

Мощность физической дозы в воздухе прямо пропорциональна силе анодного тока и для фокусных расстояний  $f > 50$  см при распространении

При известном качестве лучей всегда возможно от физической дозы в воздухе  $D$  перейти к поверхностной плотности энергии  $E$  лучей, попадающих в ионизационную камеру

$$E = \frac{D}{\gamma},$$

где  $\gamma$  — коэффициент электронного преобразования лучей в воздухе.

Чтобы найти физическую дозу  $D_x$  в какой-либо среде, достаточно разность поверхностных плотностей энергий излучения до и после слоя среды разделить на толщину этого слоя  $x$ :

$$D_x = \frac{E_0 - E_1}{x} = \left( \frac{D_0}{\gamma_0} - \frac{D_1}{\gamma_1} \right) \cdot \frac{1}{x}.$$

Однако, в практике обычно не подсчитывают  $D_x$ , а оценивают то или другое действие лучей в какой-либо среде тем ионизационным эффектом, которое создают в воздухе нор-

<sup>1</sup> В немецкой литературе иногда дозу в воздухе называют Einfallsdosis.

О П Е Ч А Т К И

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
133	16 снизу	$\delta = \delta \cdot n$	$\delta = \delta_1 \cdot n$

Справочн. по рентгеном.

лучей в слабо поглощающей среде приблизительно обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Кроме того, мощность физической дозы зависит от величины и формы кривой напряжения, а также материала и толщины применяемого фильтра.

Таблица 52

Приблизительные значения мощности физической дозы в воздухе в  $r/min$  для постоянного напряжения,  $f = 50$  см и  $J = 1$  мА

Напряжение в kV	Толщина фильтра в мм													
	0'	1	2	3	5	6	0,1	0,3	0,5	0,8	1,3	1,8	2,3	
			Al						Cu					
20	1,5	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	5,0	1,2	0,4	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	8,5	2,8	1,5	1,1	0,6	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—
80	13,0	5,0	2,8	2,4	1,3	1,0	1,8	—	—	—	—	—	—	—
100	29,0	8,0	4,5	3,6	2,1	1,7	2,5	1,3	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1	
120	—	12,0	6,7	5,4	3,1	2,5	3,6	2,1	1,6	1,1	0,7	0,4	0,25	
140	—	16,5	9,3	6,8	4,1	3,3	4,6	3,0	2,2	1,6	1,1	0,7	0,5	
160	—	22,0	14,0	9,0	5,4	4,3	5,7	3,8	3,0	2,0	1,4	1,0	0,7	
180	—	28,0	18,0	12,0	6,7	5,5	6,6	4,8	3,6	2,7	1,9	1,5	1,1	
200	—	35,0	22,5	17,0	9,0	6,6	8,0	6,0	4,5	3,5	2,5	2,0	1,6	

Чтобы найти приблизительно значение мощности физической дозы в воздухе при работе трубки от аппарата с пульсирующим напряжением позади фильтра толщиной  $\delta_1$ , необходимо в приведенной выше таблице 52 взять значение, отвечающее фильтру из того же материала, но толщиной  $\delta = \delta_1 n$

где  $n = \frac{U_{max}}{U_{eff}}$  — коэффициент амплитуды кривой напряжения, таблица 176.

Физическая доза на поверхности освещаемого тела при его наличии всегда больше, чем в воздухе на том же расстоянии и при тех же условиях освещения, так как само тело рассеивает лучи.

Влияние рассеянного излучения возрастает с увеличением поля освещения и жесткости излучения (последнее лишь до  $\Delta_{Cu} = 1,7$  при степени неоднородности  $n = 2,5$ , после чего вследствие уменьшения коэффициента рассеяния это влияние снова убывает).

В качестве рассеивающего тела обычно берется вода.

Процентная глубинная доза также зависит от расстояния поля освещения и качества лучей. В качестве экспериментальной среды берется вода.

<sup>1</sup> Эквивалент стенки трубки зависит от типа ее и колеблется от 1 мм до 3 мм Cu. Первый столбец отвечает воображаемому случаю отсутствия стенки, что отвечает толщине фильтра, равной нулю.

Значение множителя, на который следует умножить время достижения 100 г в воздухе на расстоянии 100 г в воздухе на расстоянии 50 см, чтобы получить время освещения при том же излучении для получения действующей на поверхности воды дозы в 100 г (по Гольтгузену)

Размер поля	16 см <sup>2</sup>			50 см <sup>2</sup>			100 см <sup>2</sup>						
	0,1	0,3	1,0	1,7	0,1	0,3	1,0	1,7	0,1	0,3	1,0	1,7	
Расстояние в см	30	0,342	0,335	0,326	0,322	0,324	0,303	0,290	0,287	0,302	0,280	0,267	0,266
	40	0,608	0,595	0,585	0,572	0,576	0,539	0,516	0,511	0,536	0,498	0,476	0,472
	50	0,95	0,930	0,906	0,894	0,90	0,842	0,806	0,798	0,838	0,779	0,743	0,739
	60	1,37	1,34	1,31	1,29	1,30	1,21	1,16	1,15	1,21	1,12	1,07	1,06
	75	2,14	2,09	2,04	2,01	2,03	1,89	1,81	1,80	1,89	1,75	1,67	1,66
Размер поля	150 см <sup>2</sup>			200 см <sup>2</sup>			400 см <sup>2</sup>						
	0,1	0,3	1,0	1,7	0,1	0,3	1,0	1,7	0,1	0,3	1,0	1,7	
Расстояние в см	30	0,288	0,267	0,258	0,255	0,281	0,262	0,252	0,249	0,277	0,257	0,247	0,245
	40	0,512	0,475	0,458	0,453	0,499	0,465	0,449	0,443	0,493	0,457	0,440	0,435
	50	0,800	0,742	0,716	0,703	0,780	0,726	0,701	0,693	0,770	0,713	0,687	0,680
	60	1,15	1,07	1,07	1,02	1,02	1,05	1,01	1,00	1,11	1,03	0,99	0,98
	75	1,80	1,67	1,61	1,59	1,75	1,63	1,58	1,56	1,73	1,60	1,55	1,53

Процентная глубинная доза в воде на глубине 10 см в зависимости: от расстояния фокус-поверхность, величины поля и качества излучения (по Гольтзуену)

Размер поля	50 см <sup>2</sup>			100 см <sup>2</sup>			150 см <sup>2</sup>			200 см <sup>2</sup>			400 см <sup>2</sup>												
	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7					
Расстояние в см	30	16	21	24	26	27	21	25	28	31	32	24	29	31	35	25	30	33	35	37	27	33	36	39	40
	40	18	23	26	28	28	22	27	30	33	34	25	31	34	36	26	33	36	39	40	30	38	41	43	45
	50	20	25	28	30	31	23	29	32	35	36	26	33	35	38	28	35	39	41	42	33	40	44	47	49
	60	21	26	29	31	32	24	30	33	36	37	27	34	37	39	29	37	39	42	43	35	43	47	49	51
	75	22	27	30	32	33	26	31	34	37	39	29	35	38	40	31	38	41	43	44	37	45	49	50	52

Значение множителя, на который следует умножить время достижения 100 г в воздухе на расстоянии 50 см, чтобы получить при том же излучении время освещения для достижения дозы в 100 г на глубине 10 см в воде (по Гольтзуену)

Размер поля	50 см <sup>2</sup>			100 см <sup>2</sup>			150 см <sup>2</sup>			200 см <sup>2</sup>			400 см <sup>2</sup>												
	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7					
Расстояние в см	30	1,37	1,40	1,21	1,20	1,11	1,31	1,09	0,96	0,87	0,83	1,10	0,91	0,84	0,78	1,04	0,83	0,78	0,72	0,68	0,93	0,76	0,70	0,64	0,61
	40	2,94	2,28	1,84	1,83	1,75	2,21	1,80	1,60	1,44	1,38	1,88	1,50	1,35	1,27	1,76	1,33	1,27	1,16	1,11	1,49	1,17	1,08	1,03	0,97
	50	4,15	3,28	2,89	2,68	2,57	3,33	2,52	2,34	2,14	2,04	2,83	2,21	2,06	1,88	2,57	2,04	1,87	1,72	1,65	2,13	1,74	1,58	1,47	1,39
	60	5,67	4,53	4,02	3,73	3,57	4,57	3,64	3,27	2,97	2,85	3,91	3,09	2,90	2,64	3,56	2,78	2,52	2,42	2,32	3,03	2,32	2,12	2,02	1,92
	75	8,48	6,83	6,06	5,64	5,43	6,62	5,51	4,96	4,52	4,23	5,70	4,69	4,26	4,01	5,22	4,23	3,90	3,69	3,54	4,25	3,48	3,19	3,10	2,94



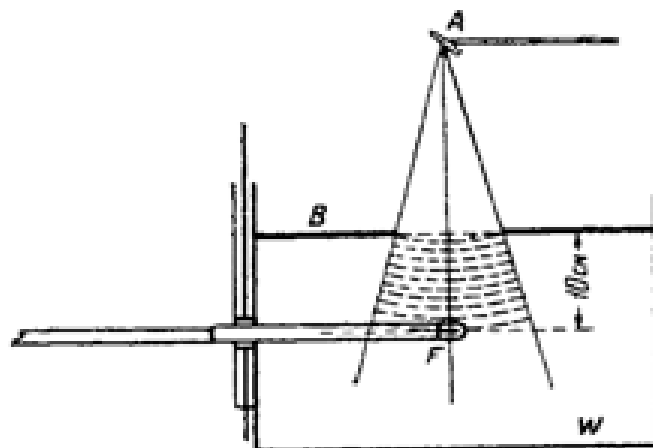


Рис. 43. Схема измерений с водяным фантомом.

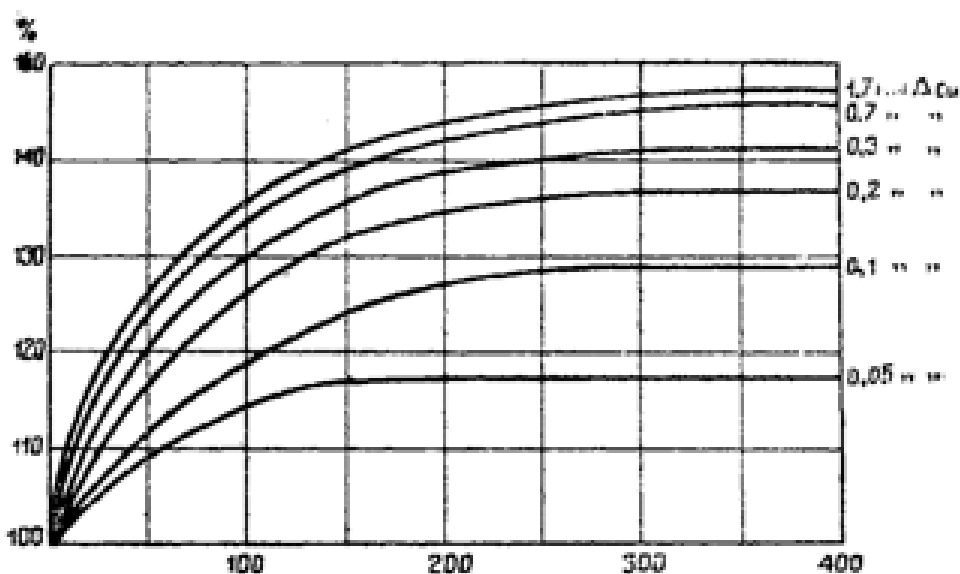


Рис. 43а. Влияние обратного рассеяния поверхности, в зависимости от величины поля освещения:  $\Delta C_m$ , от 0,05 мм до 1,7 мм.

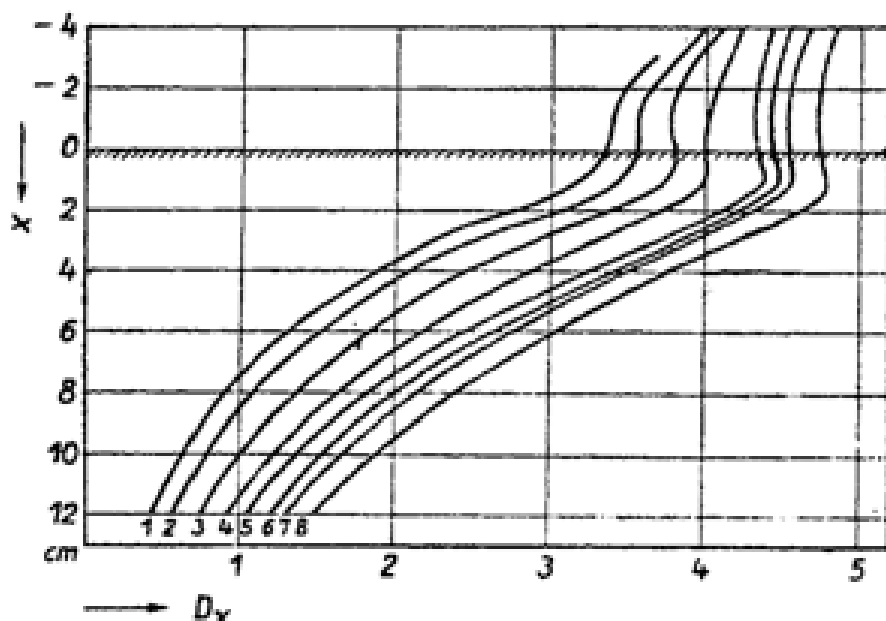


Рис. 43б. Распределение физической дозы по глубине в водяном фантоме для  $u = 175$  kV,  $\delta = 0,5$  мм,  $Z_p = 2,5$  мм,  $\Delta r_n = 40$  см: 1) поле  $(2 \times 2)$  см<sup>2</sup>, 2) поле  $(17 \times 17)$  см<sup>2</sup>.

В границах поперечного сечения конуса первичных лучей значение процентной глубинной дозы приблизительно остается постоянным.

Вследствие фильтрации и влияния рассеянного излучения качество действующего излучения изменяется по глубине.

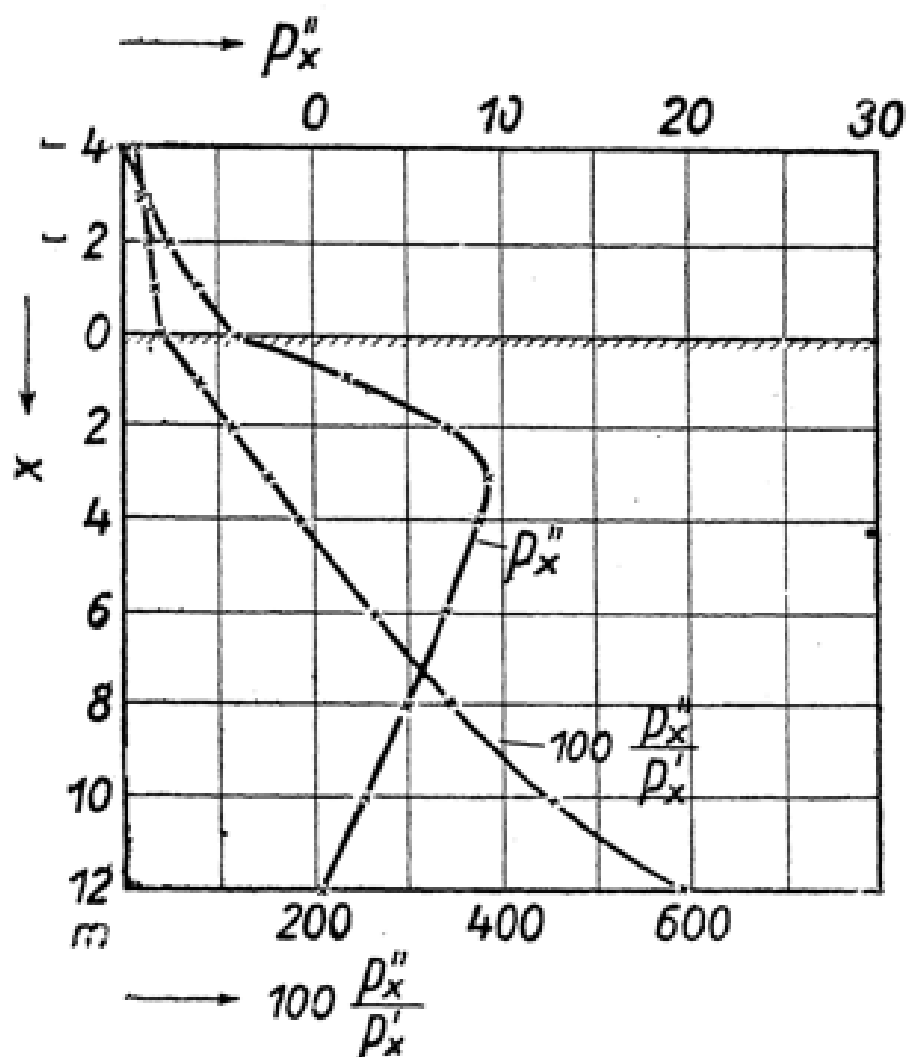


Рис. 44. Мощность физической дозы от рассеянного излучения  $P''_x$  в водяном фантоме и относительное влияние ее  $100 \cdot \frac{P''_x}{P'_x}$  в зависимости от глубины  $x$  для тех же условий освещения и поля освещения  $(10 \times 17) \text{ см}^2$ .

Таблица 56

Качество  $\Delta_{\text{Cu}}$  действующего излучения на поверхности воды и на глубине 10 см при различных значениях слоя половинного ослабления первичного излучения

$\Delta_{\text{Cu}}$ в мм	Размер поля освещения $\text{см}^2$	Качество действующего излучения	
		на поверхности	на глубине 10 см
1,23	$10 \times 10$	0,95 мм Cu	0,73 мм Cu
1,14	$10 \times 10$	0,9 " "	0,7 " "
0,76	$10 \times 15$	0,69 " "	0,54 " "
0,36	$10 \times 15$	0,33 " "	0,30 " "
0,12	$10 \times 15$	0,11 " "	0,118 " "
0,16	$10 \times 15$	0,057 " "	0,076 " "

При проникновении лучей в живой организм имеет место то или иное биологическое действие их, причем реакция организма проявляется лишь через некоторое время.

На характер и величину этой реакции влияют как условия освещения объекта лучами, так и индивидуальные особенности организма.

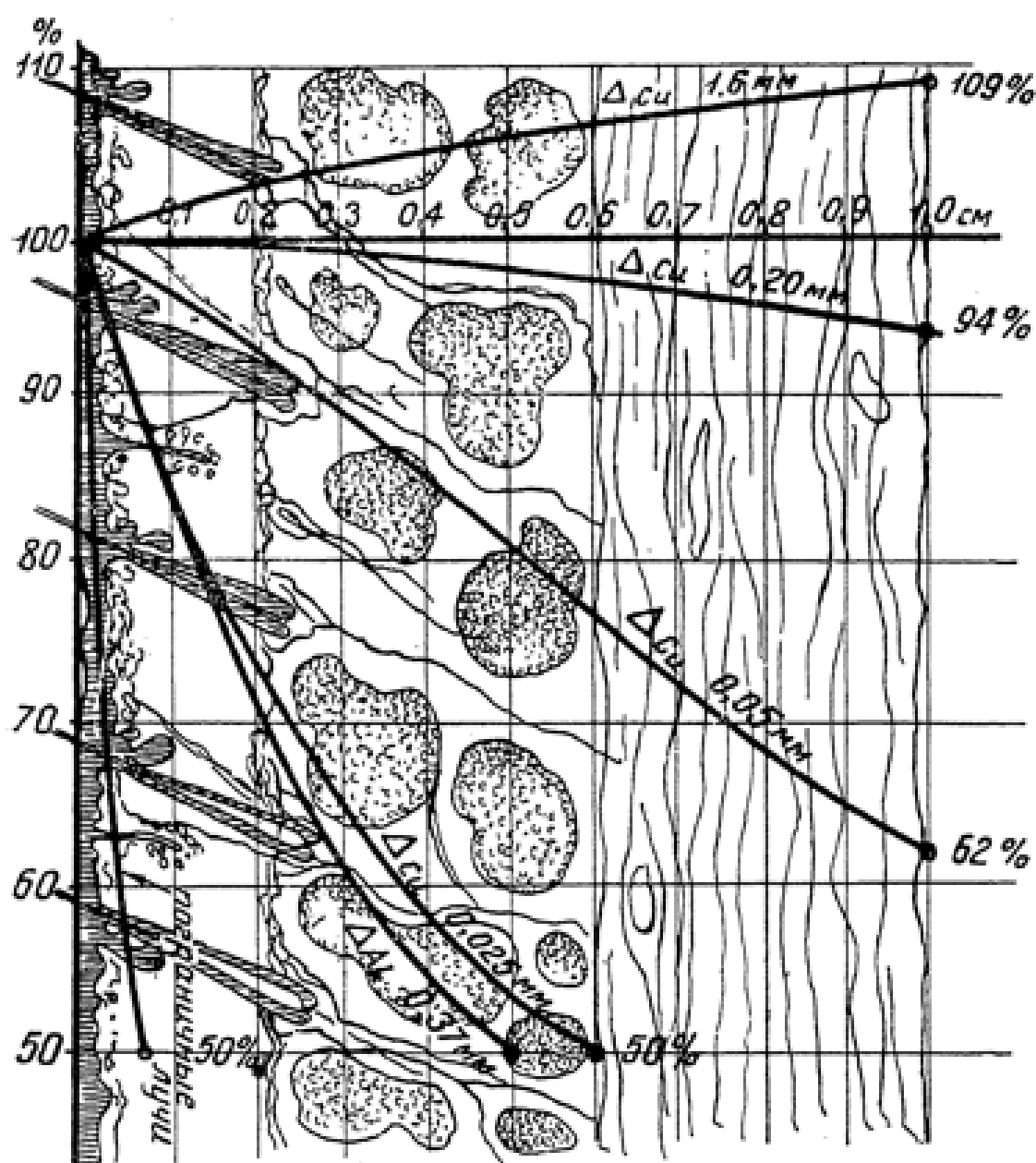


Рис. 45. Распределение процентной глубинной дозы лучей различного качества в ткани кожи: 1 (сверху) — 180 кВ, 1,5 мм Cu 2 — 120 кВ, 3,0 мм Al, 3 — 80 кВ, 1,0 мм Al, 4 — 60 кВ, без фильтра, 5 — 30 кВ, без фильтра, 6 — 8 кВ, без фильтра (линдемановское стекло).

Из физических факторов, влияющих на биологический эффект, можно указать на: качество применяемого излучения, интенсивность его, распределение дозы во времени и в пространстве.

В качестве наиболее отчетливых реакций организма, изученных на большом числе разнообразных объектов, являются так называемые эритемная доза (HED) и эпиляция доза (ED). Следует заметить, что критериями этих доз служит внешнее проявление на коже, вследствие чего одному и тому же наименованию в зависимости от условий освещения могут отвечать различные биологические процессы в организме.

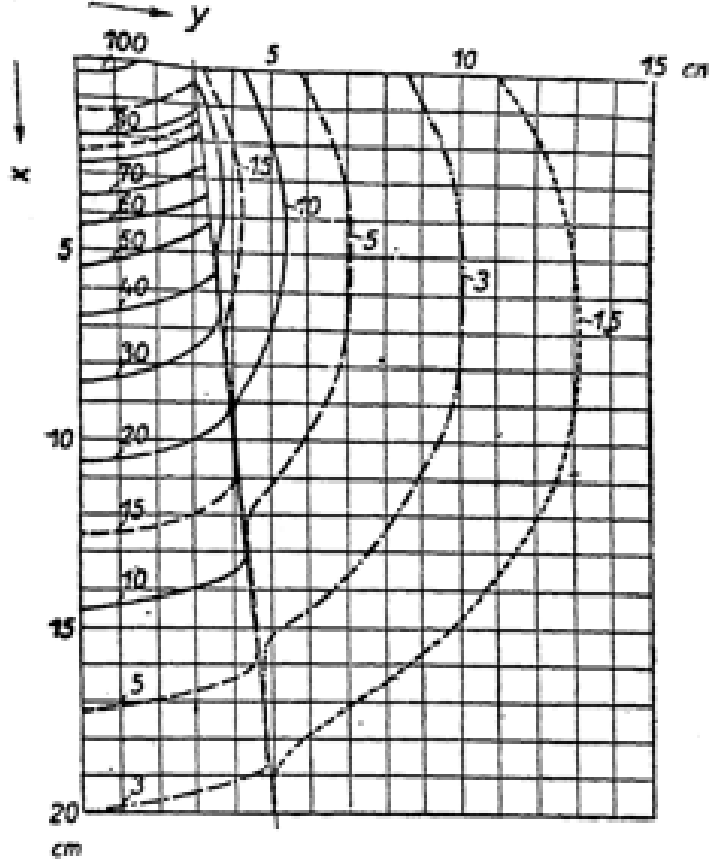


Рис. 46. Распределение процентной глубинной дозы в водяном фантоме для плоскости, содержащей центральный луч, при  $U = 140$  kV, 0,5 мм Cu, для круглого поля освещения  $d = 6$  см и фокусного расстояния 30 см.

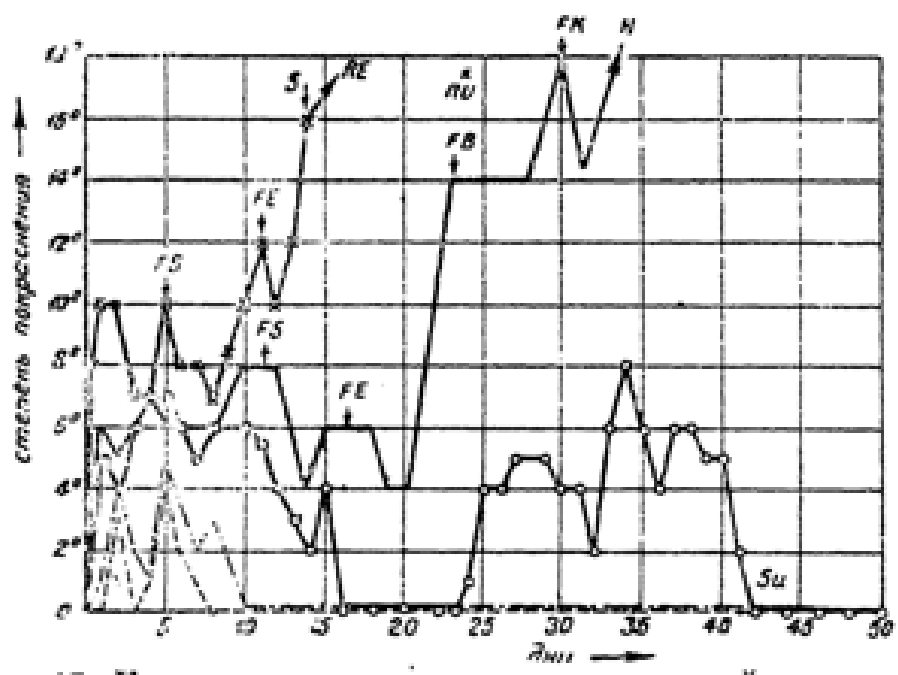


Рис. 47. Кривая эритемы при возрастании физической дозы для мягких лучей (75 kV, без фильтра  $\Delta$  Al = 0,42 мм) по Рейснеру, ..... 150 r, -.-.-.-. 300 r o-o-o- 600 r, - - - - - 900 r, x-x-x-x-x-x- 1200 r.

Физические измерения объемной плотности энергии лучей производятся путем определения физической дозы в воздухе и выражаются в рентгенах.

Аналогично вместо интенсивности лучей обычно задается мощность физической дозы в воздухе, выраженная в  $r/\text{мин}$ . Протекание биологической реакции во времени для различных значений физической дозы лучей показано на рис. 47.

Влияние качества применяемого излучения сказывается на биологическом эффекте и количественно и качественно.

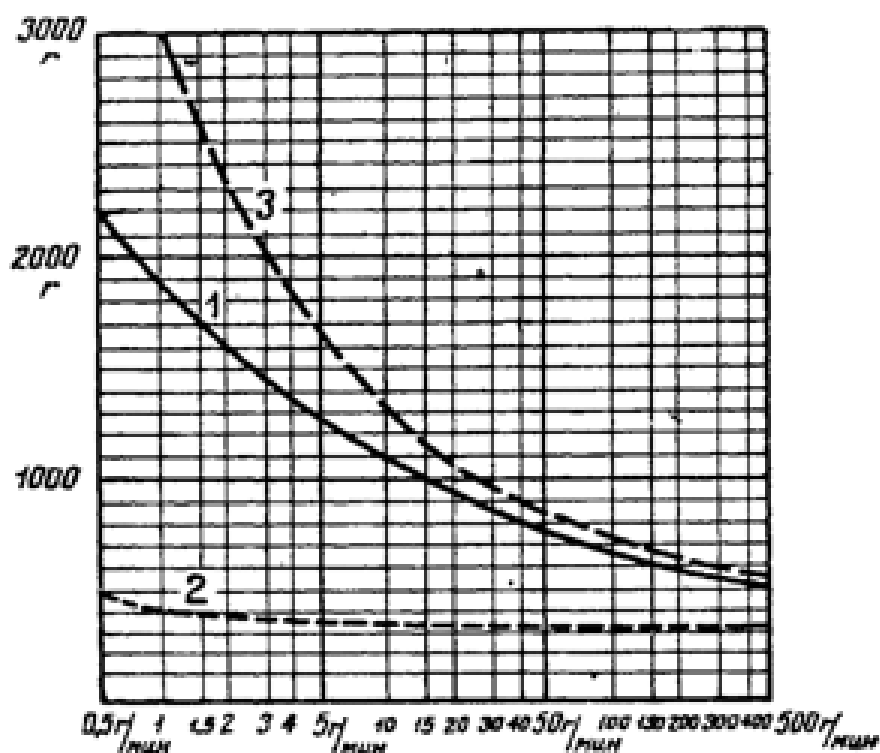


Рис. 48. Изменение эритемной (1), эритемной (2) и толерантной (3) дозы, в зависимости от величины мощности физической дозы в воздухе.

Из совокупности экспериментального материала вытекает, что:

1) Химические изменения, происходящие в какой-либо среде, пропорциональны энергии лучей, преобразованной в этой среде в энергию электронов.

2) Вредное действие длинноволновой части спектра до  $1,5\text{Å}$  не зависит от длины волны.

3) В области излучений, применяемых для поверхностной терапии, действие не зависит от качества лучей. 1 HED соответствует 590  $r$ .

4) В области очень мягких лучей эритемное действие носит качественно другой характер, вследствие чего для достижения эритемы указываются значения от 300 до 5 000  $r$ .

5) Допустимо указать приблизительное значение мощности физической дозы в воздухе, при которой в условиях длительного освещения лучами реакция человеческого организма явно не проявляется (толерантная доза) по Митшеллеру 5 000  $r$  за 15,9 лет или 0,04  $r$  в час. Как среднее из многих данных, обычно принимается 10  $\mu r$  в секунду.

Влияние объема освещения (величина поля освещения и толщина объекта) сказывается на величине физической дозы, отвечающей кожной толерантной

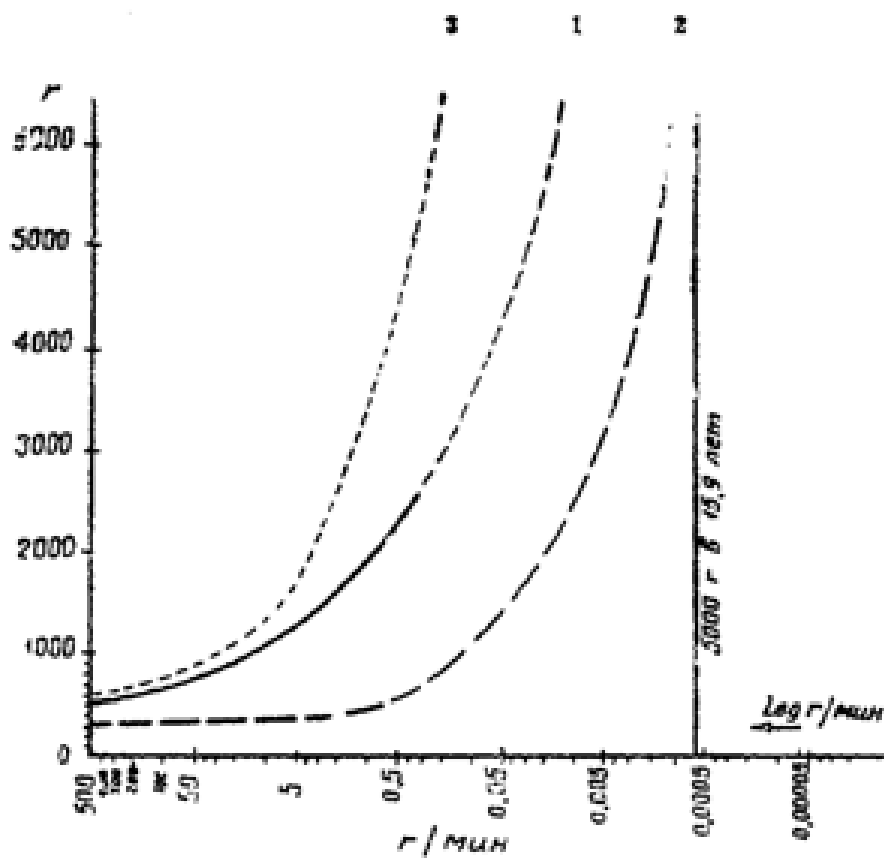


Рис. 49. Эритемная (1), эпиляционная (2) и толерантная (3) физическая доза, в зависимости от мощности физической дозы в воздухе. Справа показано значение средней мощности толерантной дозы по Мутшеллеру (приблизительно  $10 \mu\text{r}/\text{sec}$ ).

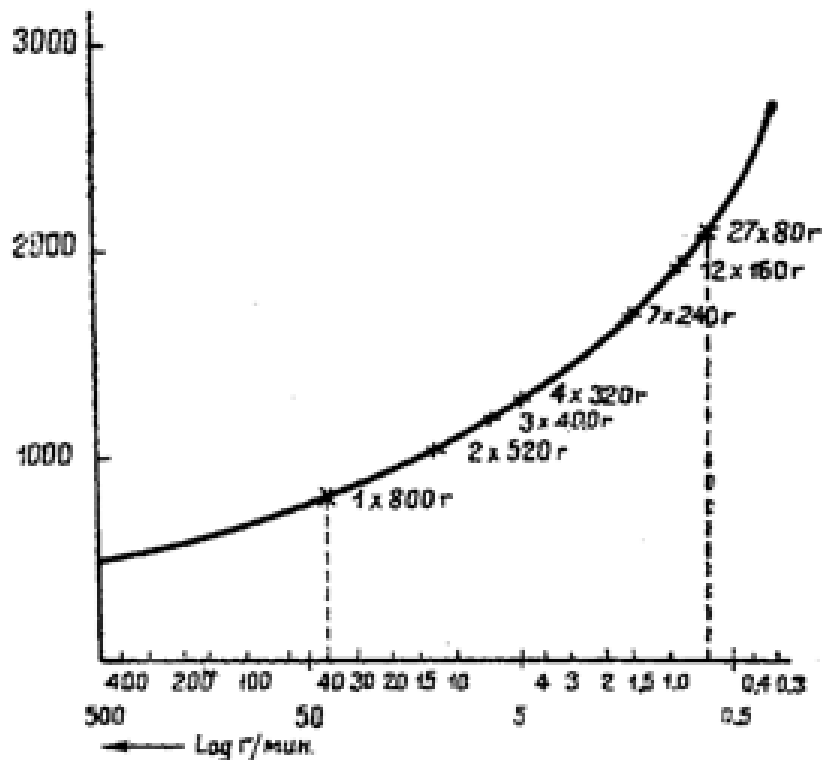


Рис. 50. Сравнение физических доз в воздухе, отвечающих эритемному действию при длительном и фракционном освещении, в зависимости от мощности физической дозы в воздухе.

дозе. Чем больше поле освещения, тем меньше следует принимать значение условно безвредной мощности физической дозы.

Распределение дозы во времени влияет на качество и величину реакции. При фракционном освещении:

Таблица 57

Доза при ежедневном освещении и различном фракционировании, отвечающая одинаковому эритемному действию

10%	27	дней	=270%	в 27	дней
20%	12	"	=240%	" 12	"
30%	7	"	=210%	" 7	"
40%	4	"	=160%	" 4	"
50%	3	"	=150%	" 3	"
65%	2	"	=130%	" 2	"
100%	1	"	=100%	" 1	"

## § 7. Защита от рентгеновских лучей

Условно безвредная мощность физической дозы при длительных освещении обычно принимается

$$P_T = 10 \text{ } \mu\text{r/sec.}$$

Защита должна быть предпринята не только от первичного, но и от вторичного (рассеянного) излучения.

Выполнение правил работы с рентгеновскими лучами составляет неотъемлемую часть всех мероприятий по защите.

Самым распространенным материалом для защиты от рентгеновских лучей служит свинец, почему нормы толщин защитных слоев указываются именно для этого материала, и защитные свойства всех прочих материалов оцениваются по сравнению со свинцом. Край  $K$  полосы поглощения  $Pb$  приходится в рабочей части спектра, почему при подсчетах поглощения свинцом следует пользоваться либо экспериментальными данными о поглощении, либо проследить фильтрацию по кривой распределения плотности интенсивности по спектру. Расчеты по  $\lambda_{eff}$  или  $\lambda_0$  повлекут за собой ошибки в определении необходимых толщин свинца.

Коэффициент ослабления рентгеновских лучей в свинце при высоких напряжениях генерирования ( $U > 250 \text{ kV}$ ) по Егеру.

$$\mu_{\infty} = \frac{64,5 \cdot 10^4}{U^2 (\text{kV})} = 0,424 \cdot 10^4 \lambda^2 \text{ для } \lambda \text{ в } \text{Å}.$$

Линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей позади значительных слоев свинца по данным:

1) Намнаса:

kV	123	153	210	300	400
$\mu (\text{см}^{-1})$	43	27,5	2,1	6,6	3,74

2) Алиханьяна и Космана

kV	206	229	308	338	368	378	382	400	454	460	495
$\mu (\text{см}^{-1})$	8,8	5,8	4,3	3,5	3,0	3,5	3,4	2,7	2,2	2,4	1,9

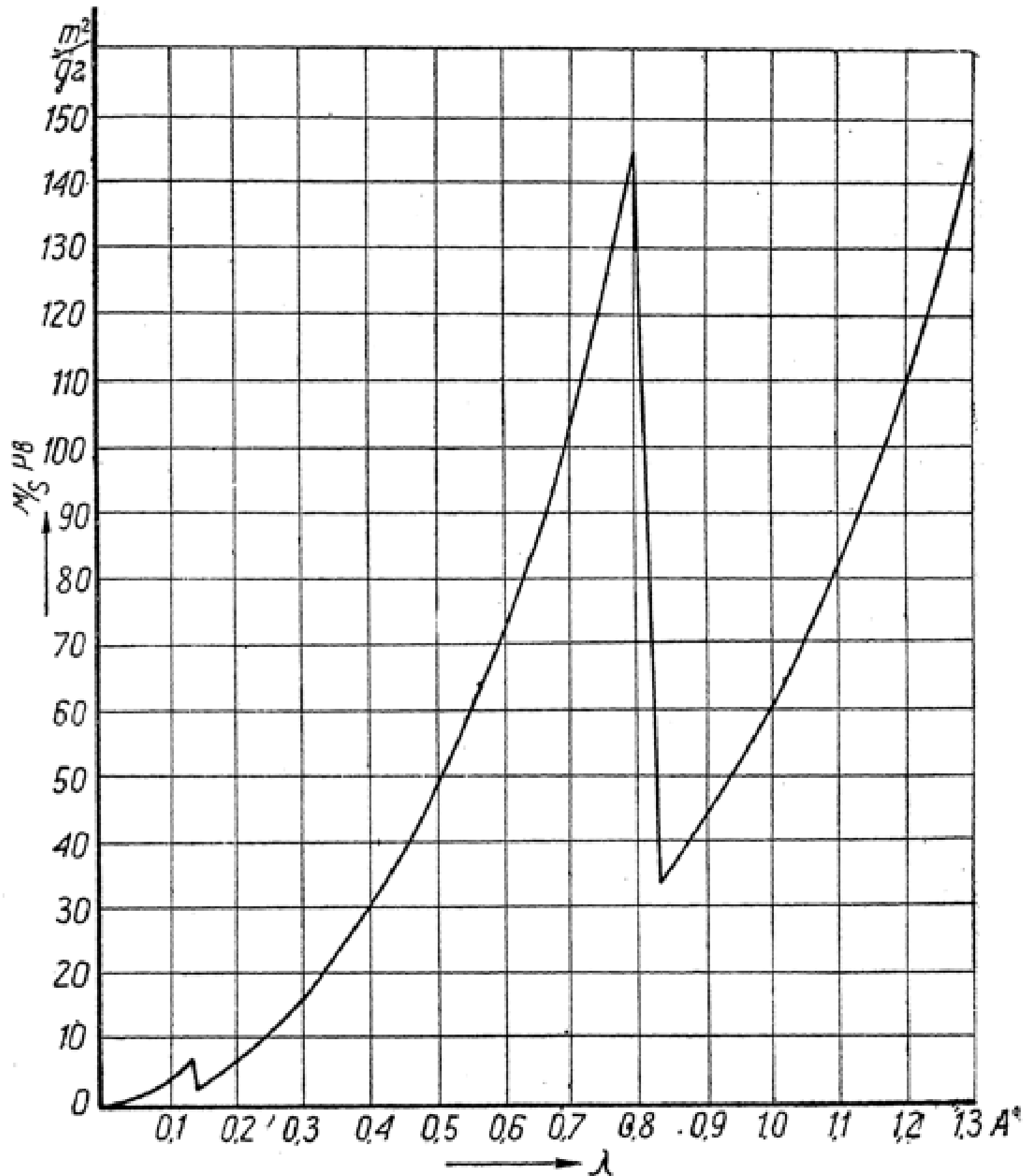


Рис. 51 Массовый коэффициент ослабления лучей в свинце, в зависимости от длины волны излучения.



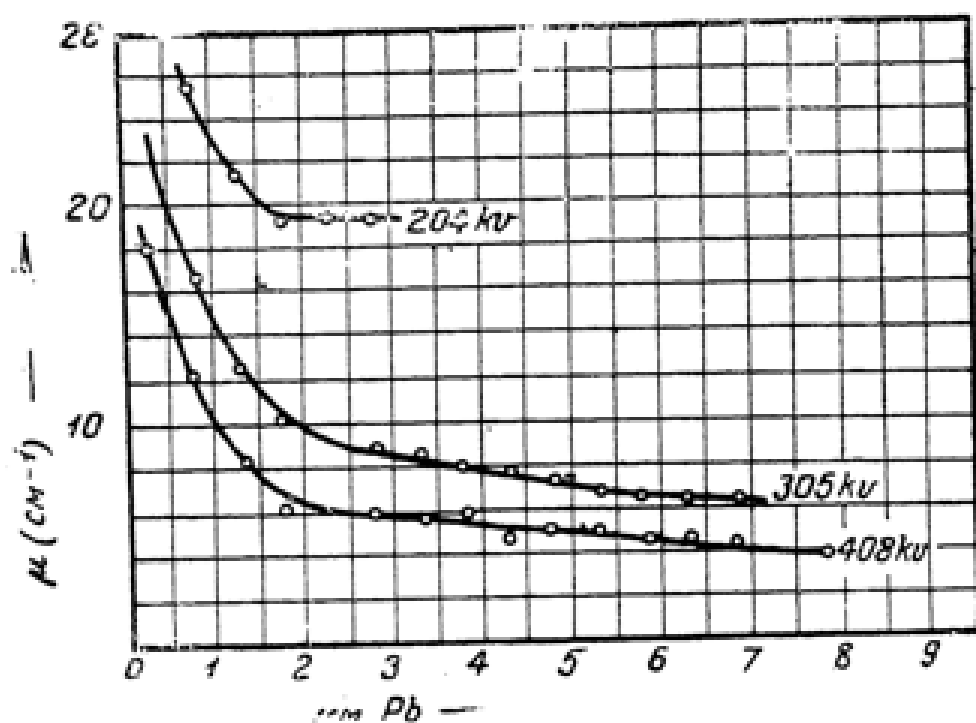


Рис. 52. Линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей, в зависимости от толщины свинцового фильтра по Герману и Егеру, для различных напряжений генерирования.

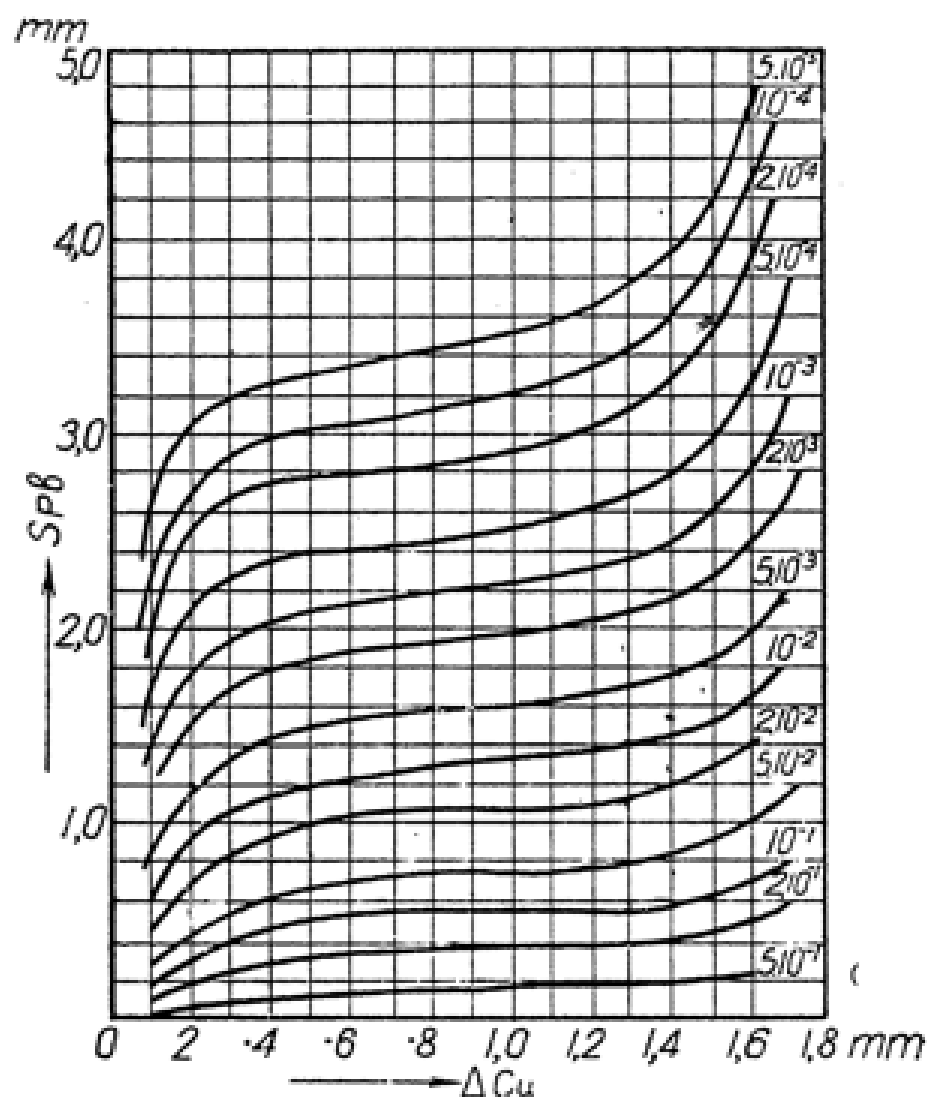


Рис. 53. Толщина слоя металлического свинца, ослабляющего излучение в заданное число раз, в зависимости от качества смешанного излучения.

Значения отношения интенсивности рентгеновских лучей после прохождения свинцового слоя к интенсивности падающих лучей для нефiltroванного излучения при различных напряжениях генерирования (по Кейю)

Толщина слоя Рь в мм	70 kV	100 kV	200 kV
0,0	1	1	1
0,2	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
0,4	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$
0,6	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
0,8	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
1,0	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$
1,2	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
1,4	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
1,6	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
1,8	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
2,0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$
2,5		$3,4 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
3,0		$1,2 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$
3,5			$4,0 \cdot 10^{-5}$
4,0			$2,0 \cdot 10^{-5}$
4,5			$1,1 \cdot 10^{-5}$
5,0			$6,3 \cdot 10^{-6}$
5,5			$3,9 \cdot 10^{-6}$

Международные нормы защиты от вредного действия рентгеновских лучей (в СССР юридической силы не имеют).

Напряжение в kV	Толщина свинца в мм	Напряжение в kV	Толщина свинца в мм
75	1	200	4
100	1,5	250	6
125	2	300	9
150	2,5	350	12
175	3	400	15

Под свинцовым эквивалентом  $A_{Pb}$  какого-либо образца материала подразумевается толщина слоя металлического свинца (обычно в мм), которая ослабляет рентгеновское излучение в той же мере, как и материал образца данной толщины. Это число должно быть помечено на любом защитном устройстве.

В тех случаях, когда основной частью защитного материала является свинец (свинцовые стекла и резина), удобно пользоваться так называемым свинцовым коэффициентом. Свинцовый коэффициент есть отношение

$$K_{Pb} = \frac{d_{Pb}}{d_x} \leq 1,$$

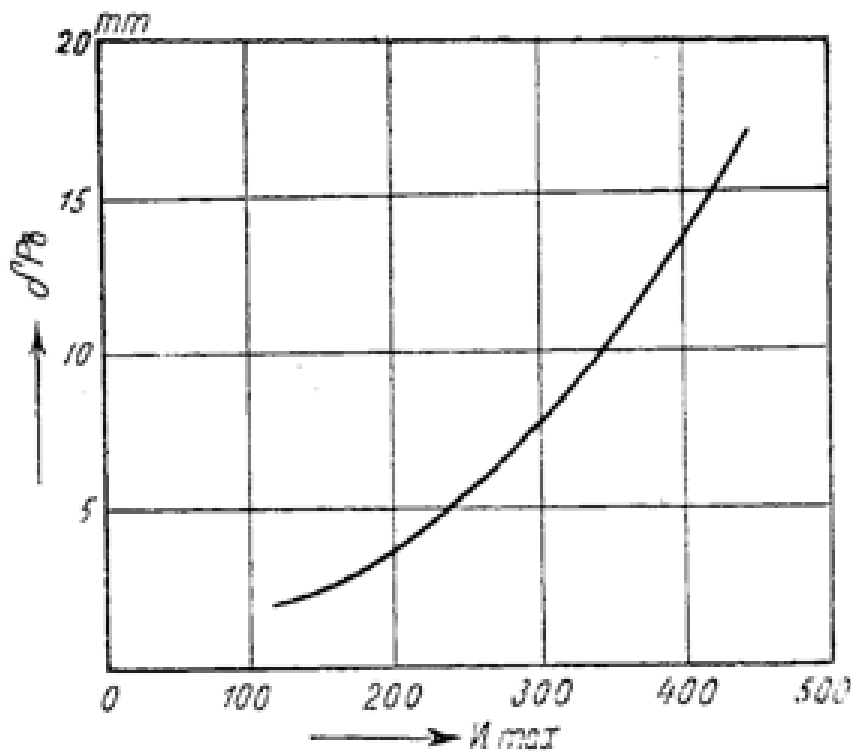


Рис. 54. Толщина свинцового слоя, ослабляющего излучение для того же значения мощности физической дозы, как и 3,5 мм Рb при  $U=100$  кV, в зависимости от напряжения генерирования.

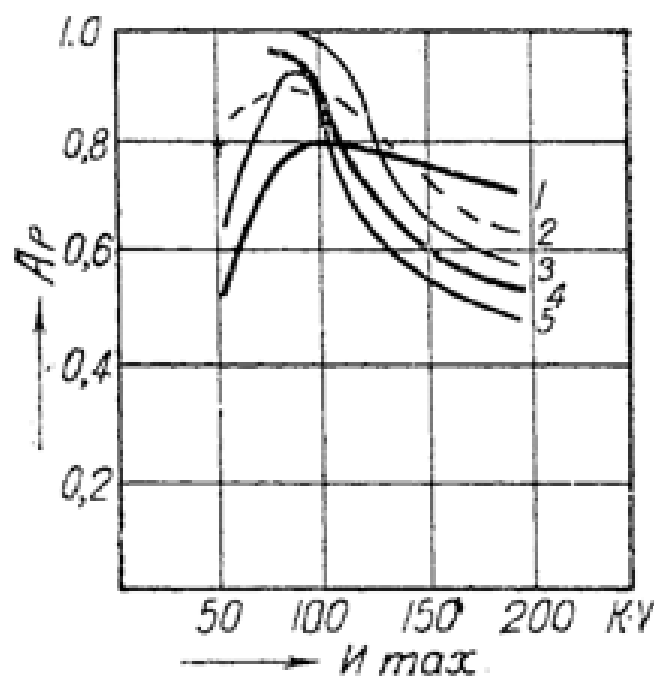


Рис. 55. Свинцовый эквивалент ряда материалов, в зависимости от напряжения генерирования излучения  $U$ : 1) Al 50 мм, 2) Латунь 4 мм, 3) сталь 6 мм, 4) Zn 4 мм, 5) Sn 1 мм.

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
146	Рис. 54	$U = 100 \text{ kV}$	$U = 200 \text{ kV}$

Справочн. по рентгеном.

т. е. то число, на которое следует умножить толщину слоя материала, чтобы получить эквивалентную толщину свинца.

$$\text{Для стекол } K_{Pb}^{\circ}/o = 10\rho - 20$$

$$\text{„ резины } K_{Pb}^{\circ}/o = 10\rho - 13$$

где  $\rho$  — плотность защитного материала.

Иногда задается эквивалент данного материала по свинцу, т. е. толщина материала, эквивалентная по ослаблению излучения одному миллиметру свинца.

Свинцовый эквивалент данного образца несвинцового материала зависит от напряжения генерирования излучения и имеет максимум в области

$$(U_K)_{Pb} = 90 - 110 \text{ kV.}$$

Эквивалент несвинцового материала по свинцу зависит как от напряжения, так и от толщины материала (влияние фильтрации), а также поля освещения (влияние рассеянных лучей).

Таблица 58а

Значения толщины материалов в миллиметрах, ослабляющих рентгеновское излучение в той же мере, как и один миллиметр металлического свинца

Материал	Плотность в г/см <sup>3</sup>	Напряжение в kV				
		50	80	100	150	200
Свинец . . . . .	11,3	1	1	1	1	1
Бариевый цемент . . . . .	3,5	10	—	4	7,5	9,0
Бариевый кирпич, малое поле / большое поле . . .	—	—	—	—	—	13,3/14,6
Пластины Кемпе-Лорей . . .	—	—	—	—	—	16
Кирпич, малое поле / большое поле . . . . .	2	—	—	—	—	80/110
Бетон, малое поле / большое поле . . . . .	—	—	—	—	—	47/60
Состав: камень, песок, цемент	2,1	100	—	70	75	—
Клинкер-цемент . . . . .	1,5	135	—	100	105	80
Гранит-цемент . . . . .	2,1	110	—	70	80	—
Дерево . . . . .	—	—	—	1000	—	—
Сталь . . . . .	7,8	11,5	—	6,5	9,5	11,5

Если известна необходимая для защиты толщина материала при малом поле освещения, то при больших полях допустимо необходимую толщину считать на 20% больше.

Защита от вторичного (рассеянного) излучения тем лучше, чем дальше защищаемый объект от рассеивающих тел, если защитный слой расположен вблизи трубки, и чем ближе объект к рассеивающим поверхностям, если защитный слой вблизи этого объекта.

В большинстве случаев практических условий работы для защиты от вторичных лучей достаточно иметь слой, свинцовый эквивалент которого равен 1 мм Рb. Защитный слой всегда лучше делать охватывающим трубку или объект.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- F. Kirchner, Handbuch der Experimental-Physik, B. XXIV, T. I.  
L. Giebe, K. Nitzge. Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen, 1930.  
M. Siegbahn, Spektroskopie der Röntgenstrahlen, 1931.  
H. Holthusen. Grundlagen u. Praxis der Röntgenstrahlen-Dosierung, 1933.  
И. В. Порошков. Физические основы дозиметрии рентгеновских лучей, 1934.  
М. И. Неменов, Рентгенология, 1933.

Zentralblatt für Radiologie.

Zeitschrift für Physik.

Physikalische Zeitschrift.

Zeitschrift für techn. Physik.

Fortschr. im Gebiete der Röntgenstrahlen.

Strahlentherapie.

Annalen der Physik.

British Journal of Radiology.

American Journal of Radiology.

Bureau of Standards Journal of Research.

Physikal Review.

Journal de Physique Appliquée.

Журнал экспериментальной и теоретической физики.

Достижения в области рентгенотехники.

Вестник рентгенологии.

ОТДЕЛ V

**РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ**

О П Е Ч А Т К И

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
151	9 сверху	однородное	инородное
152	Заголовок табл. 59	—	$I = 4 \text{ mA}$ , $f = 50 \text{ см}$ с усил. экраном

Справочн. по рентгеном.



## § 1. Анализ поглощением

Метод поглощения применяется для обнаружения неоднородностей в испытуемом образце без его разрушения.

В медицине этот метод нашел широкое распространение при диагностике; в технике при просвечивании металлов и готовых изделий.

Реагентом на рентгеновские лучи, в зависимости от рода исследуемого образца, обычно служит либо флуоресцирующий экран, либо фотографическая пластинка.

Если образец имеет толщину  $d$  и в нем имеется однородное включение, линейные размеры которого в направлении лучей  $x$ , то для однородных рентгеновских лучей и небольших полей освещения имеет место соотношение

$$I_1 = I_0 e^{-\mu d}.$$

Интенсивность лучей позади места включения порока  $x$

$$I_2 = I_0 e^{-[\mu(d-x) + \mu_1 x]},$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{(\mu_1 - \mu)x}.$$

Обнаружение небольших инородных включений зависит от: применяемого качества рентгеновского излучения, влияния вторичного излучения, возникающего в образце и окружающей среде, размеров фокусного пятна трубки и техники выполнения снимка.

Из приведенного выше соотношения вытекает, что при заданном  $x$  контрастность наблюдаемого позади образца эффекта от лучей тем больше, чем больше длина волны лучей, так как пренебрегая рассеянием имеем

$$\mu_1 - \mu = (\alpha_1 \rho_1 - \alpha \rho) \lambda^3,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho$  — плотности разнородных веществ,  $\alpha_1$  и  $\alpha$  — множители при  $\lambda^3$  в формуле для массового коэффициента ослабления веществ

$$\frac{\mu}{\rho} = \alpha \lambda^3 + \beta.$$

Однако длительность экспозиций, для получения тех же почернений на снимках, с увеличением длин волн сильно возрастает, вследствие чего для каждого рода образца имеются оптимальные условия для анализа поглощения.

**Влияние напряжения на обнаруживаемость порока в алюминиевой отливке толщиной в 4 см**

Напря- жение в кV	Наименьшая ве- личина порока в мм, хорошо ви- димая глазом	Время экспозиции в секундах
50	0,5	730
80	0,6	210
100	0,7	60
130	0,9	30
170	1,2	10

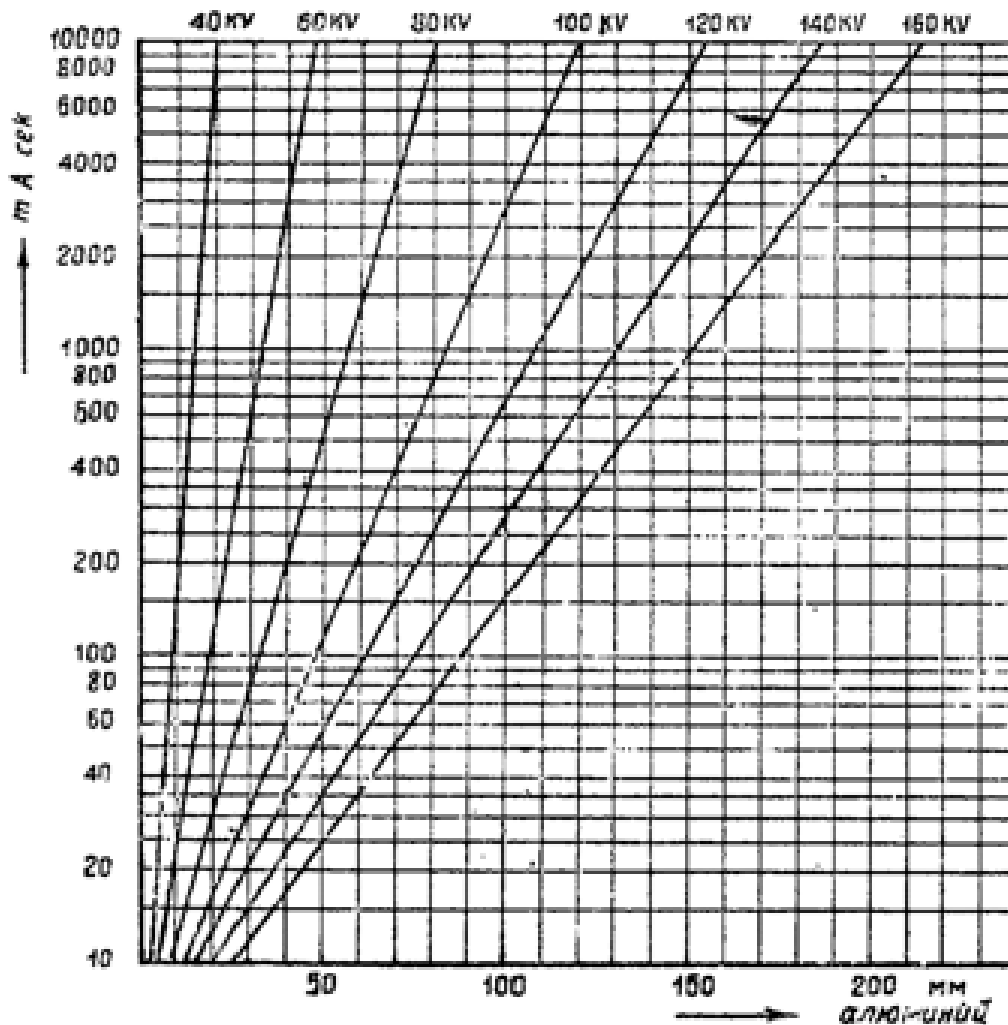


Рис. 56. Диаграмма нагрузки трубки для алюминия (расстояние ф, кV-пластинка 40 см; абсолютная плотность почернения 0,5, без усилительных экранов).

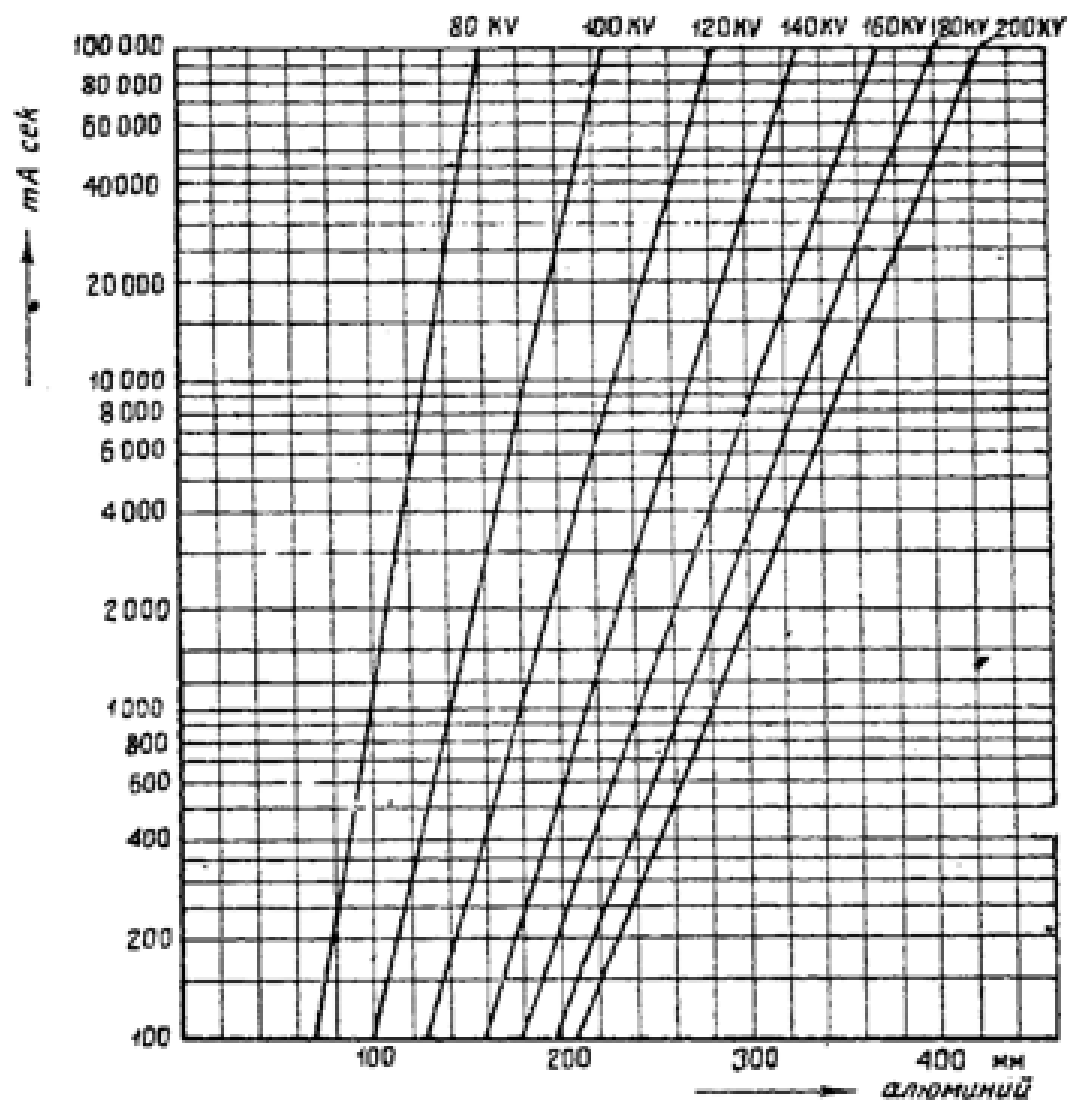


Рис. 57. То же, что и рис. 56 с двумя усилительными экранами.

Таблица 60

**Влияние толщины куска литого железа на время экспозиции**

Почернение пластинки во всех случаях одинаково.

$$S \approx 0,7.$$

Снимок без усиливающего экрана —  $FD = 50$  см;  
напряжение — 205 kV

Сила тока — 8 мА . . .					
Толщина . . . . .	1	2	3	4	5 см
Время экспозиции . . .	$1/2$	4	10	30	70 мин

Предельные толщины материалов, позволяющие получить плотность почернения  $S = 0,5$  на пленке при заданной экспозиции

## А л ю м и н и й

Нагрузка Ватт. мнв.	kV								
	kW <sub>S</sub>	80	100	120	140	160	180	200	220 kV

## 1. Без усилительных экранов

500	10	300	71	100	126	150	168			мм Al
1400	10	840	82	115	147	176	197			мм Al
5000	10	3000	96	136	173	203	230			мм Al

## 2. С двумя усилительными экранами

500	10	300	114	162	202	232	260	280	294	мм Al
1400	10	840	130	182	224	258	288	310	326	мм Al
5000	10	3000	148	205	252	290	324	350	365	мм Al

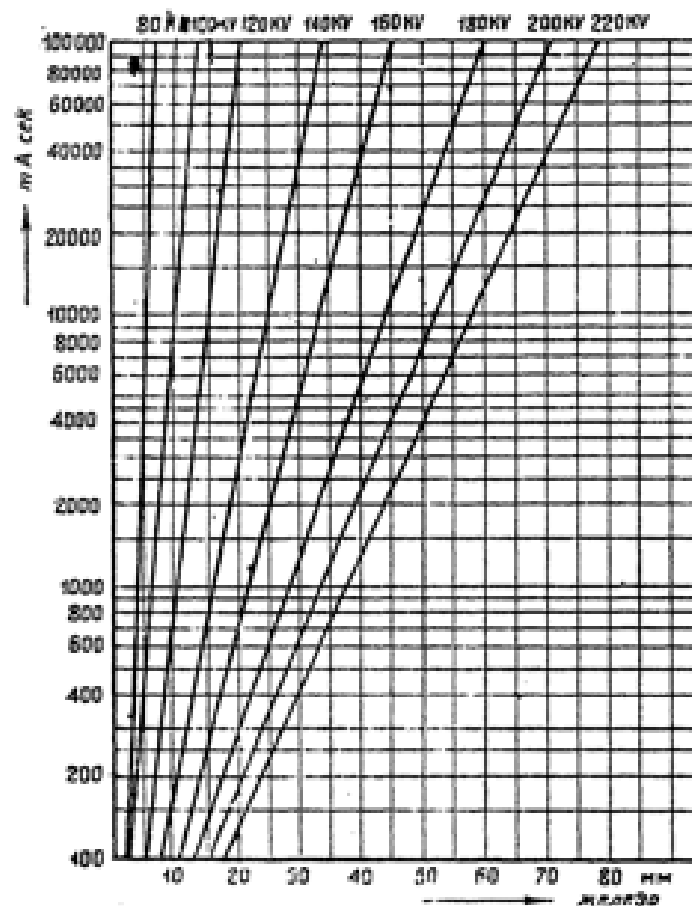


Рис. 58. То же, что и рис. 56, для железа.

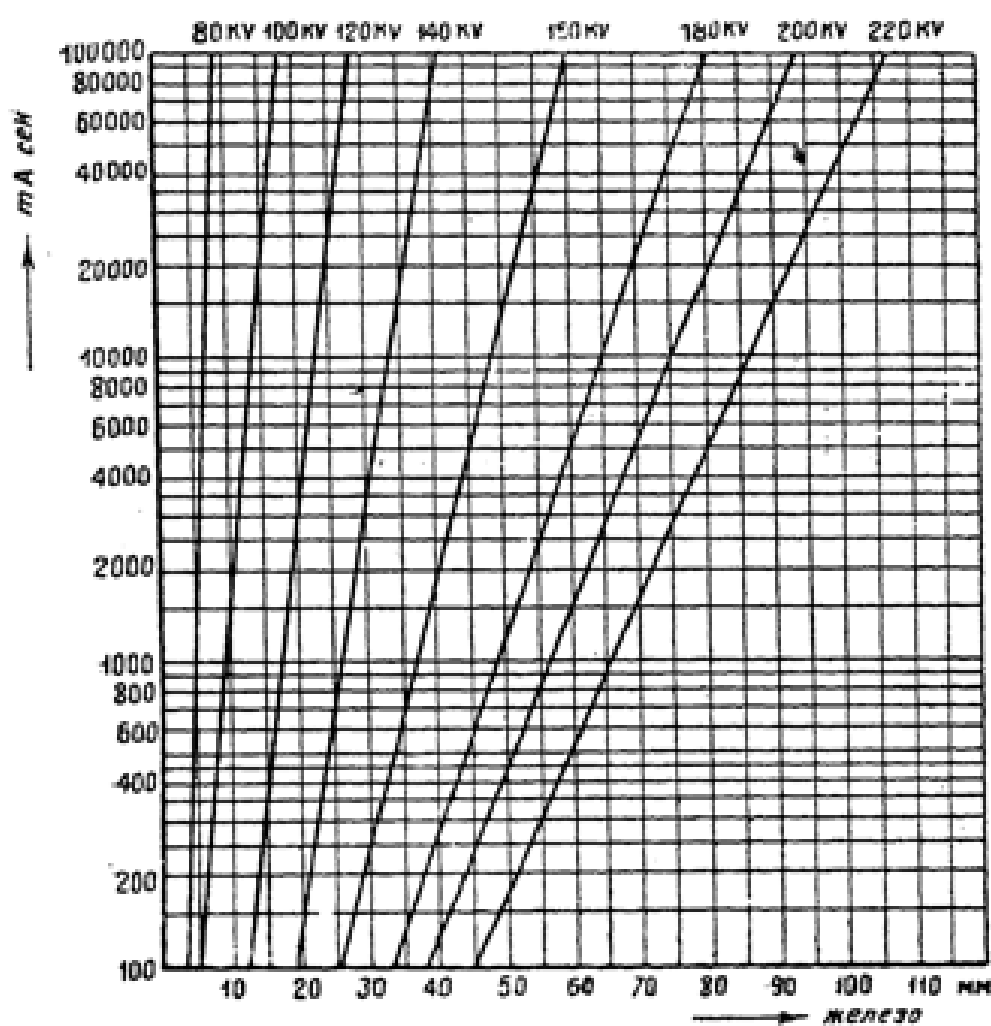


Рис. 59. То же, что и рис. 57, для железа.

Железо

Нагрузка Ватт. мин.	кV								220 кV
	kW <sub>S</sub>	80	100	120	140	160	180	220	

1. Без усилительных экранов

500	10	300	5	7	12	19	25	32	37	40 мм Fe
1400	10	840	6	10	15	23	31	39	46	50 мм Fe
5000	10	3000	7	12	17	26	37	48	56	61 мм Fe

2. С двумя усилительными экранами

500	10	300	6	12	20	30	41	53	61	69 мм Fe
1400	10	840	7	14	22	32	46	60	70	79 мм Fe
5000	10	3000	8	16	26	37	52	69	80	90 мм Fe

## Предельные толщины материалов, поддающиеся просвечиванию

Нагрузка ватт	kV								
	60	80	100	120	140	160	180	200	220
А л ю м и н и й									
500	20	38	57	75	94	107	121	130	мм Al
1400	28	51	76	98	119	137	152	161	" Al
5000	38	68	99	127	151	173	192	203	" Al
Ж е л е з о									
500	—	2	4	7	11	15	19,5	23	27 мм Fe
1400	—	3,5	5,5	9,5	15	20,5	27	31,5	36,5 " Fe
5000	—	5,5	7,5	12,5	20	27	35,5	41,5	48 " Fe

Вторичное излучение, возникающее в образце и распространяющееся во всех возможных направлениях, сказывается в размывании контуров инородного включения (вплоть до их исчезновения).

Влияние этого рассеянного излучения тем больше, чем больше просвечиваемый объем образца (поле освещения и толщина) и чем слабее защищена пластинка.

Для ослабления указанного эффекта применяется:

- 1) сокращение поля освещения до 1—2 см<sup>2</sup> при малых образцах;
- 2) подвижные диафрагмы для ослабления влияния вторичного излучения (в медицине называются Буки-бленды), что позволяет повысить разрешающую способность метода для толстых образцов, но увеличивает время экспозиции;
- 3) защитные устройства для кассеты из слоя, непроницаемого для вторичного излучения, исходящего от окружающих предметов.

Величина фокусного пятна трубки имеет существенное влияние на резкость наблюдаемой картины (снимки), а значит и разрешающую способность.

Необходимо держать трубку на возможно далеком расстоянии от образца ( $f > 50$  см), а пластинку возможно плотно к нему прижатой (или возможно близко расположенной).

Что касается техники выполнения снимка, то необходимо иметь в виду, что наилучшие условия для наблюдения контрастности лежат в области плотности почернений  $S = 0,7 — 1,0$ .

Выбор проявительных средств определяется сортом пластинки и характером снимка.

Для уменьшения времени экспозиции можно применять усилительные экраны, однако при этом неизбежно размывание контуров наблюдаемых очертаний.

Время экспозиции вообще говоря зависит от рода испытуемого образца, техники снимка, качества и мощности излучения, генерируемого трубкой.

Определение глубины залегания пороха может быть сделано путем просвечивания изделия в различных направлениях; например методом послойных снимков.

## § 2. Качественный анализ

Для обнаружения какого-либо элемента в веществе пользуются главным образом спектром испускания. При этом требуется меньшее время экспозиции и меньшее количество исследуемого вещества.

Характеристический спектр рентгеновского излучения не зависит от условий возбуждения. Положение линий и отношение их интенсивностей являются в первом приближении свойством атома, а не молекулы, поэтому практически не зависят от того, входит атом в какое-либо химическое соединение или нет. (Например, линии одинаковы у железа, окиси железа, перлита, цементита, мартенсита и аустенита)<sup>1</sup>. Практическая граница качественного рентгеновского анализа лежит около калия  $Z = 19$ . Обнаружение элементов с более низким атомным номером затрудняется сильным поглощением характеристического излучения легких элементов и отсутствием кристаллов с соответственно большими постоянными решеток, необходимых для разложения излучения в спектр.

Серия *K*, вследствие простоты структуры, вообще говоря, обеспечивает более надежное решение.

Границей надежного обнаружения элемента является приблизительно 0,1-весового процента.

Для ослабления вуали от непрерывного спектра напряжение генерирования излучения выбирается лишь немногим выше потенциала возбуждения серии.

Для ослабления рассеянного излучения применяется щелеобразная подвижная диафрагма у кристалла, пропускающая лишь правильно отраженные лучи, и кроме того снимается лишь узкий участок спектра, включающий ожидаемые линии.

Основные трудности метода заключаются в следующем:

1) *Испарение в вакууме более летучих веществ.* Для ослабления этого эффекта исследуемое вещество либо погружается в другое тугоплавкое, но слабо поглощающее лучи вещество (например графит), либо переводится в тугоплавкое соединение (например окись).

Весьма выгодным является предварительное химико-аналитическое разделение главных составных частей препарата.

2) *Возможность совпадений линий различных элементов,* особенно существенно тогда, когда на ряду с элементами очень большой концентрации имеются элементы в очень малых концентрациях.

Рекомендуется вначале получить возможно более широкий спектр данного вещества, для того чтобы установить главные его составные части.

Качественный анализ по спектру испускания применим лишь для твердых веществ. Препараты в виде порошка втираются на испаряющую, при помощи напильника, поверхность анода. Металлы припаиваются или привариваются к аноду в форме пластинки толщиной в 1 мм.

Материалом анода служат обычно медь или серебро, которое может быть получено в более чистом виде.

<sup>1</sup> Изучение края полосы поглощения показывает, что тонкая структура его зависит от того, в каком химическом соединении находится атом.

## Совпадение линий. Обработано Хаддинггом. Серия К

Приведенные во втором и третьем ряду спектральные линии имеют длины волн, одинаковые или сходные с дублетом  $K\alpha$  или  $K\beta$  элемента, указанного в первом столбце. Случай особенно хорошего совпадения ( $\pm 5X$ ) отмечены жирным шрифтом. Цифрами обозначен порядок отражения. Стоящее под каждым элементом в первом столбце число представляет собой длину волны наиболее интенсивной линии  $\alpha_1$  в X

Элемент	$\alpha_1, \alpha_2$	$\beta_1$		
16 S 5361	Mo $L\alpha_2$ Cs $L2\beta_1$	Co $K3\alpha_1$	Ge $K4\alpha_2$ Cs $L2\beta_2$ Sm $L2\alpha_1$	Ti $K2\beta_1$ Va $K2\beta_1$
17 Cl 4718	Pb $L4\alpha_2$ Mo $L\gamma_1$ Ce $L\beta_1$	Nd $L2\alpha_1$ As $K4\alpha_2$		
19 K 3734	Cd $L\beta_1$ Nb $K5\alpha_1$	W $L3\beta_2$	Sm $L2\gamma_1$	Sb $L\alpha_2$
20 Ca 3352	Tb $L2\beta_2$ J $K4\alpha_1$	Pt $L3\beta_1$ Yb $L2\alpha_1$	CuK $2\alpha_2$	Te $L\beta_1$
21 Sc 3025	Te $L\beta_4$ Ta $L2\alpha_1$	Tl $L3\beta_1$	Sb $L\gamma_2$ Ba $L\alpha_2$ Os $L2\alpha_1$ Ba $L\alpha_1$ Ba $L\beta_3$ Cs $L\beta_2$ La $L\beta_2$ Cr $K\alpha_1, \alpha_2$ Ce $L\beta_1$ Jr $L2\beta_2$ Br $K2\gamma_2$ Hg $L2\beta_2$ Eu $L\beta_1$ Th $L2\alpha_1$ Dy $L\gamma_2$ Sr $K2\alpha_2$ J $K4\alpha_1$ Gd $L\beta_2$ Bi $L2\gamma_1$ Ho $L\beta_3$ Cd $K3\alpha_2$ UL $2\beta_2$ Pt $L\gamma_1$ La $K4\alpha_1$ Cp $L\beta_3$ Pr $K4\alpha_2$	Cu $K2\beta_1$ Rb $K3\alpha_2$ Rb $K3\alpha_1$ Ge $K2\alpha_2$ Va $K\alpha_1, \alpha_2$ Th $L3\beta_1$ Bi $L2\alpha_1$ Ta $L2\gamma_1$ As $K2\beta_2$ Pt $L2\gamma_1$ Bi $L2\beta_2$ Pd $K3\alpha_2$ Tb $L\beta_3$ Dy $L\beta_2$ Cp $L\alpha_1$ Cs $K4\alpha_2$ Nb $K2\gamma_2$ Y $K2\beta_1$ Os $L\alpha_1$
22 Ti 2743	J $L\beta_2$ Cp $L2\beta_2$	Hf $L2\beta_1$ U $L3\alpha_1$ Ti $K\beta_1$		
23 Va 2498	Ba $L\beta_3$ Cs $L\gamma_2$ Ti $K\beta_2$	Ge $K2\alpha_1$		
24 Cr 2285	La $L\beta_2$ Bi $L2\alpha_1$	Th $L3\beta_1$ Va $K\beta_1$		
25 Mn 2097	Eu $L\alpha_1$ As $K2\beta_1$ Ce $L\beta_3$ Ru $K3\alpha_1$ Th $L2\alpha_2$	Pr $L\beta_2$ Nd $L\beta_3$ Pr $L\gamma_3$ Eu $L\beta_4$		
26 Fe 1932				
27 Co 1785	Er $L\alpha_2$ Tb $L\beta_4$ Tb $L\beta_1$	Hg $L\gamma_2$ Er $L\gamma_1$		
28 Ni 1655	Yb $L\alpha_1$ YK $2\alpha_1$ Rb $K2\beta_1$	Eu $L\gamma_2$ Ho $L\beta_4$		
29 Cu 1537	Ba $K4\alpha_1$ Ta $L\alpha_2$ Th $L2\beta_1$	In $K3\alpha_1$ Tb $L\gamma_1$		
30 Zn 1432	Yb $L\beta_3$ Tb $L\gamma_4$	U $L2\beta_1$ Cp $L\beta_4$	Th $L2\gamma_1$ Ru $K2\alpha_1$	W $L\beta_4$ Au $L\alpha_2$
32 Ge 1251	Yb $L\gamma_1$ Ta $L\beta_5$	W $L\beta_3$ Hg $L\alpha_2$	Ta $L\gamma_1$ La $K3\alpha_2$ Ti $L\gamma$ Pt $L\beta_1$ Ce $K3\alpha_1$ Ta $L\gamma_4$ Bi $L\gamma$ Ti $L\gamma_1$	W $L\gamma_5$ Ir $L\beta_3$ Ag $K2\alpha_2$
33 As 1173	Cp $L\gamma_3$ Os $L\beta_2$ Ir $L\beta_4$ Ta $L\gamma_5$	Ba $K3\alpha_2$ Hf $L\gamma_2$ Pb $L\alpha_1$ Pd $K2\alpha_1$		ULI W $L\gamma_3$ Au $L\beta_1$



Элемент	$\begin{matrix} < \\ > \end{matrix} \alpha_1, \alpha_2$	$\begin{matrix} \sim \\ \sim \\ \sim \end{matrix} \beta_1$		
34 Se 1102	Ag $K 2\alpha_1$ Au $L\beta_4$ Ta $L\gamma_2$ W $L\gamma_1$	La $K 3\alpha_1$ Ir $L\beta_5$ Pt $L\beta_3$	Ti $L\beta_3$ Ir $L\gamma_1$ Pb $L\beta_1$	Bi $L\beta_6$ Sn $K 2\alpha_2$
35 Br 1038	Pr $K 3\alpha_2$ Au $L\beta_5$ W $L\gamma_4$	As $K\beta_2$ Ti $L\beta_4$ In $K 2\alpha_1$	Sb $K 2\alpha_1$ Pt $L\gamma_2$ Bi $L\beta_5$	Bi $L\beta_3$ Au $L\gamma_1$ U $L\alpha_2$
37 Rb 924	Sb $K 2\alpha_1$ Bi $L\beta_3$ Br $K\beta_2$	Br $K\beta_1$ UL $\alpha_2$	Pb $L\gamma_4$ Sb $K 2\beta_1$ Pb $L\gamma_2$	Hg $L\gamma_4$ Th $L\beta_6$
38 Sr 873	J $K 2\alpha_1$ Au $L\gamma_4$ Pb $L\gamma_5$	Hg $L\gamma_2$ Ti $L\gamma_1$ Sn $K 2\beta_1$	Th $L\beta_3$ Ba $K 2\alpha_2$ IK $\beta_2$	U $L\beta$ Ba $K 2\alpha_1$
39 V 827	Bi $L\gamma_5$ Pb $L\gamma_1$ Sb $K 2\alpha_4$	Ti $L\gamma_3$ Hg $L\gamma_4$ Rb $K\beta_1$	Th $L\beta_3$ La $K 2\alpha_1$	U $L\beta_4$
40 Zr 784	Th $L\beta_1$ Th $L\beta_2$ Ba $K 2\alpha_2$	U $L\beta_4$ Sr $K\beta_1$	Ce $K 2\alpha_1$ Cs $K 2\beta_1$	U $L\beta_3$ Pr $K 2\alpha_1$
41 Nb 745	J $K 2\beta_1$ Sr $K\beta_2$ U $L\beta_2$	Bi $L\gamma_4$ Th $L\beta_3$	Nd $K 2\alpha_2$	Th $L\gamma_1$
42 Mo 708	La $K 2\alpha_2$ U $L\beta_1$ Yb $K 3\alpha_1$	Ce $K 2\alpha_1$ UL $\beta_3$ Zr $K\beta_1$	Th $L\gamma_6$ W $K 3\alpha_1$	Ce $K 2\beta_1$ Sm $K 2\alpha_1$
43 Ma 672	Cs $K 2\beta_1$ Ba $K 2\beta_1$ Th $L\gamma_5$	Pr $K 2\alpha_1$ Ir $K 4\beta_1$	Eu $K 2\alpha_2$ Pr $K 2\beta_1$	U $L\gamma_2$
44 Ru 642	Nd $K 2\alpha_2$ Th $L\gamma_1$	W $K 3\alpha_2$	Gd $K 2\alpha_1$ Tb $K 2\alpha_2$ Tb $K 2\alpha_1$	Pt $K 3\alpha_2$ Ag $K\alpha_2$ W $K 3\beta_2$
45 Rh 612	Mo $K\beta_2$ U $L\gamma_1$	Sm $K 2\alpha_1$ Eu $K 2\alpha_2$	Dy $K 2\alpha_2$ Ho $K 2\alpha_1$	Er $K 2\alpha_2$
46 Pd 584	Ir $K 3\alpha_2$ U $L\gamma_6$ Nd $K 2\beta_1$	Eu $K 2\alpha_1$ Gd $K 2\alpha_2$	Er $K 2\alpha_1$	Pt $K 3\beta_1$
47 Ag 558	Ru $K\beta_1$ Tb $K 2\alpha_1$	Ru $K\beta_2$ Pt $K 3\alpha_1$	Yb $K 2\alpha_1$	
48 Cd 534	Rh $K\beta_1$ Rh $K\beta_2$	Dy $K 2\alpha_1$ Ho $K 2\alpha_2$		
49 In 511	Pd $K\beta_1$ Pd $K\beta_2$	Er $K 2\alpha_2$ Ir $K 3\beta_1$		
50 Sn 490	Ag $K\beta_1$ Ag $K\beta_2$	Pt $K 3\beta_1$ Yb $K 2\alpha_2$	In $K\beta_2$	W $K 2\alpha_2$
51 Sb 469	Cd $K\beta_1$	Yb $K 2\alpha_1$	Sn $K\beta_2$	W $K 2\alpha_1$
52 Te 451	Cd $K\beta_2$	In $K\beta_1$	Sb $K\beta_2$ Ir $K 2\alpha_2$	Cs $K\alpha_1$ Ba $K\alpha_2$
53 J 433	In $K\beta_2$ W $K 2\alpha_2$	Sn $K\beta_1$	La $K\alpha_2$ Pt $K 2\alpha_2$ Ir $K 2\alpha_1$	U $K 3\alpha_1$ Ta $K 2\beta_1$ Hf $K 2\beta_2$ Ba $K\alpha_2$
55 Cs	Sb $K\beta_2$	Te $K\beta_1$	Ba $K\gamma_1$ Ce $K\beta_2$ Os $K 2\beta_1$	Pr $K\alpha_1$

Элемент	$\sum_{i=1}^n \alpha_i$	$\sum_{i=1}^n \beta_i$
400	Ir K 2 $\alpha_2$	W K 2 $\beta_2$ Ce K $\alpha_1$ Ce K $\alpha_2$ Nd K $\alpha_1$ Ir K 2 $\beta_1$ Te K 2 $\alpha_1$ Pr K $\alpha_2$ Pr K $\alpha_1$ Il K $\alpha_2$ Pt K 2 $\beta_1$ Bi K 2 $\alpha_2$ Nd K $\alpha_1$ Sn K $\alpha_1$ Au K 2 $\beta_2$ Au K 2 $\beta_1$ La K $\beta_2$ Il K $\alpha_2$ Eu K $\alpha_1$ Eu K $\alpha_2$ Ce K $\beta_2$ Sa K $\alpha_2$
56 Ba 384	Sb K $\beta_2$ Te K $\beta_2$ Pt K 2 $\alpha_2$	TI K 2 $\alpha_2$ Au K 2 $\alpha_1$ U K 3 $\beta_1$ Os K 2 $\beta_2$ Pb K 2 $\alpha_2$ Cs K $\beta_2$ Os K 2 $\beta_1$ U K 3 $\beta_2$ Ir K 2 $\beta_2$ Pb K 2 $\alpha_1$ Ba K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Sa K $\alpha_2$ Il K $\alpha_1$ Bi K 2 $\alpha_1$
57 La 370	IK $\beta_2$ W K 2 $\beta_1$	Pt K 2 $\alpha_1$ Os K 2 $\beta_2$ TI K 2 $\alpha_1$ Cs K $\beta_2$ TI K $\alpha_2$
58 Ce 357	Tl K 2 $\alpha_2$ W K 2 $\beta_2$	Cs K $\beta_1$ Au K 2 $\alpha_1$ Gd K $\alpha_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ TI K 2 $\beta_1$
59 Pr 348	Ir K 2 $\beta_1$ Ba K $\beta_1$ Pb K 2 $\alpha_2$ Os K 2 $\beta_1$ Cs K $\beta_1$ La K $\beta_1$ Ir K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\alpha_2$ U K 3 $\beta_1$ Os K 2 $\beta_2$ Tl K 2 $\alpha_1$ Pr K $\alpha_2$ Sa K $\alpha_2$ Au K 2 $\beta_1$ U K 3 $\beta_2$ La K $\beta_2$ La K $\beta_1$ Ir K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\alpha_2$	Os K 2 $\beta_2$ TI K 2 $\alpha_1$ Cs K $\beta_2$ TI K $\alpha_2$ Pt K 2 $\beta_1$ Pb K 2 $\alpha_1$ Ba K $\beta_2$ Ir K 2 $\beta_1$ Ba K $\beta_1$ Pb K 2 $\alpha_2$ Cl K $\beta_1$ Pt K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\alpha_1$ Pt K 2 $\beta_1$ Pb K 2 $\alpha_1$
60 Nd 331	Sa K $\alpha_2$ Au K 2 $\beta_1$ U K 3 $\beta_2$ La K $\beta_2$ La K $\beta_1$ Ir K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\alpha_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K 2 $\beta_2$ Au K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ Pr K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Gd K $\alpha_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ TI K 2 $\beta_1$ Dy K $\alpha_2$ Pb K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\beta_1$ Dy K $\alpha_1$ Tb K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Dy K $\alpha_1$ Tb K $\alpha_2$ U K 2 $\alpha_2$ Ho K $\alpha_1$ Dy K $\alpha_2$ Eu K $\beta_2$ U K 2 $\alpha_2$ Yb K $\alpha_2$ Gd K $\beta_2$ Er K $\alpha_1$ Gd K $\beta_1$ Lu K $\alpha_2$ Tb K $\beta_2$ Tu K $\alpha_1$
61 Il 320	Sa K $\alpha_2$ Au K 2 $\beta_1$ U K 3 $\beta_2$ La K $\beta_2$ La K $\beta_1$ Ir K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\alpha_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K 2 $\beta_2$ Au K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ Pr K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	TI K 2 $\beta_1$ Sa K $\alpha_1$ Au K 2 $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Eu K $\alpha_1$ Sa K $\beta_1$ Pt K 2 $\beta_1$ Pb K 2 $\alpha_1$ Ce K $\beta_1$ Au K 2 $\beta_1$ Pt K 2 $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ TI K 2 $\beta_1$ Sa K $\alpha_1$ Au K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\beta_1$ TI K 2 $\beta_2$ Pb K 2 $\beta_1$ Sa K $\beta_1$ Pb K 2 $\beta_2$ Nd K $\beta_2$ Eu K $\beta_1$ Sa K $\beta_2$ Tb K $\alpha_1$
62 Sa 308	Pr K $\beta_1$ Ce K 2 $\beta_2$ Au K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ Pr K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Dy K $\alpha_2$ Pb K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\beta_1$ Dy K $\alpha_1$ Tb K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Dy K $\alpha_1$ Tu K $\alpha_2$ U K 2 $\alpha_1$ Eu K $\beta_2$ U K 2 $\alpha_2$ Yb K $\alpha_2$ Gd K $\beta_2$ Er K $\alpha_1$ Gd K $\beta_1$ Lu K $\alpha_2$ Tb K $\beta_2$ Tu K $\alpha_1$
63 Eu 298	Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ Pr K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Tb K $\alpha_1$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Dy K $\alpha_1$ Il K $\beta_1$ U K 2 $\alpha_2$ Sa K $\beta_2$ Sa K $\beta_1$ Er K $\alpha_1$ Er K $\alpha_2$ Ho K $\alpha_1$ Tu K $\alpha_1$ Tu K $\alpha_2$ U K 2 $\alpha_1$ Yb K $\alpha_1$ Yb K $\alpha_2$
64 Gd 288	Pr K $\beta_1$ Ce K 2 $\beta_2$ Au K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_2$ Pr K $\beta_2$ Pr K $\beta_1$ Ce K $\beta_2$ Tb K $\alpha_2$ Nd K $\beta_2$ Nd K $\beta_1$ Pr K $\beta_2$ Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Dy K $\alpha_2$ Pb K 2 $\beta_2$ Bi K 2 $\beta_1$ Dy K $\alpha_1$ Tb K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Dy K $\alpha_1$ Tu K $\alpha_2$ U K 2 $\alpha_1$ Eu K $\beta_2$ U K 2 $\alpha_2$ Yb K $\alpha_2$ Gd K $\beta_2$ Er K $\alpha_1$ Gd K $\beta_1$ Lu K $\alpha_2$ Tb K $\beta_2$ Tu K $\alpha_1$
65 Tb 278	Dy K $\alpha_2$ Il K $\beta_1$ Bi K 2 $\beta_1$ Gd K $\alpha_1$ U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Sa K $\beta_1$ Pb K 2 $\beta_2$ Nd K $\beta_2$ Eu K $\beta_1$ Sa K $\beta_2$ Tb K $\alpha_1$
66 Dy 269	U K 2 $\alpha_1$ Ho K $\alpha_2$ Sa K $\beta_1$	Eu K $\beta_1$ Sa K $\beta_2$ Tb K $\alpha_1$

Элемент	$\sum_{\alpha} \alpha_1, \alpha_2$		$\sum_{\beta} \beta_1$	
68 Er 252	Tb $K\beta_1$ Tu $K\alpha_2$ U $K2\alpha_1$ Ho $K\alpha_1$ Dy $K\beta_1$ Yb $K\alpha_2$ Gd $K\beta_2$ U $K 2\alpha_1$	Gd $K\beta_2$ Gd $K\beta_1$ Eu $K\beta_2$ U $K2\alpha_2$ Tb $K\beta_2$ Tb $K\beta_1$ Er $K\alpha_1$ Gd $K\beta_1$	U $K 2\beta_2$ Hf $K\alpha_1$ Hf $\Lambda \alpha_2$  W $K\alpha_1$ W $K\alpha_2$ Er $K\beta_2$ Ta $K\alpha_2$ Er $K\beta_1$ W $K\alpha_1$ Ta $K\alpha_1$ Er $K\beta_2$	Ta $K\alpha_2$ U $K 2\beta_1$ Lu $K\alpha_1$  Yb $K\beta_1$ Ta $K\alpha_1$ U $K 2\beta_2$ Hf $K\alpha_1$ U $K 2\beta_1$ W $K 2\alpha_2$ Tu $K\beta_2$ U $K 2\beta_1$
69 Tu 244				
70 Yb 236	Dy $K\beta_2$ Dy $K\beta_1$ Tu $K\alpha_1$ Tu $K\alpha_2$ Ta $K\alpha_1$ Er $K\beta_2$ Ta $K\alpha_2$ Lu $K\alpha_1$ Dy $K\beta_2$	Lu $K\alpha_2$ Tb $K\beta_2$ Tb $K\beta_1$ Gb $K\beta_2$ Tu $K\beta_1$ U $K 2\beta_2$ Er $K\beta_1$ U $K 2\beta_1$	Os $K\alpha_1$ Lu $K\beta_1$ Lu $K\beta_1$	Ir $K\gamma_2$ Os $K\alpha_2$ Yb $K\beta_2$
72 Hf 222				
73 Ta 215	W $K\alpha_1$ W $K\alpha_2$ U $K 2\beta_2$ Hf $K\alpha_1$ U $K 2\beta_1$	Yb $K\beta_1$ Tu $K\beta_1$ Er $K\beta_2$ Er $K\beta_1$	Pt $K\alpha_1$ Pt $K\alpha_2$ Ir $K\alpha_1$ Hf $K\beta_1$ Lu $K\beta_2$ Au $K\alpha_1$ Au $K\alpha_2$ Pt $K\gamma_2$ Hf $K\beta_2$ Pb $K\alpha_1$ Tl $K\alpha_1$ Tl $K\alpha_2$ W $K\beta_2$	Au $K\alpha_2$ Hf $K\beta_2$ Ir $K\alpha_2$ Os $K \alpha$
74 W 209	Os $\Lambda \alpha_2$ Yb $K\beta_2$ Ta $K\alpha_1$ Er $K\beta_2$ Ir $K\alpha_1$ Hf $K\beta_1$ Lu $K\beta_1$	Lu $K\beta_1$ Yb $K\beta_1$ Tu $K\beta_2$ U $K 2\beta_2$ Ir $K\alpha_2$ Lu $K\beta_1$ Yb $K\beta_2$		Pt $K\alpha_1$ Ta $K\beta_2$ Ta $K\beta_1$ Ir $K\alpha_1$ Ir $K\beta_1$ Pb $K\alpha_2$ Au $K\alpha_1$
76 Os 197				
77 Ir 191	Pt $K\alpha_2$ Hf $K\beta_2$ Os $K\alpha_1$	Ta $K\beta_1$ Hf $K\beta_1$ Lu $K\beta_2$	Pt $K\beta_1$ Bi $K\alpha_2$ Tl $K\alpha_1$ Tl $K\alpha_2$ Au $K\beta_1$ Pb $K\alpha_1$ Ir $K\beta_2$ Os $K\beta_2$ Pb $K\alpha_2$ Pt $K\beta_2$ Pt $K\beta_1$ Bi $K\alpha_2$ Pb $K\beta_1$	Pb $K\alpha_1$ Os $K\beta_2$ Pb $K\alpha_2$ Os $K\beta_1$ Bi $K\alpha_1$ Bi $K\alpha_2$ Ir $K\beta_1$ Tl $K\alpha_1$
78 Pt 185	W $K\beta_1$ Ta $K\beta_2$ Ir $K\alpha_1$	Au $K\alpha_2$ Ta $K\beta_1$ Hf $K\beta_2$		
79 Au 180	W $K\beta_2$ Pt $K\alpha_1$	W $K\beta_1$ Ta $K\beta_2$		
81 Tl 170	Ir $K\beta_1$ Pb $K\alpha_2$ W $K\beta_2$	Os $K\beta_2$ Os $K\beta_1$		
82 Pb 165	Bi $K\alpha_1$ Ir $K\beta_2$ Ir $K\beta_1$ Tl $K\alpha_1$ Tl $K\alpha_2$	Pt $K\beta_1$ Bi $K\alpha_2$ Os $K\beta_2$ Os $K\beta_1$	Bi $K\beta_1$ Tl $K\beta_1$	Tl $K\beta_2$
83 Bi 160	Au $K\beta_1$ Pt $K\beta_1$ Pb $K\alpha_1$ Pb $K\alpha_2$	Pt $K\beta_2$ Ir $K\beta_2$ Ir $K\beta_1$	Pb $K\beta_2$	Pb $K\beta_1$

Приведенные в  $\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$  столбцах спектральные линии имеют те же самые или близкие длины волн, как и линии  $\begin{pmatrix} L\alpha_1 \\ L\beta_1 \\ L\beta_2 \\ L\gamma_1 \end{pmatrix}$  элементов первого столбца

Случай особенно хорошего совпадения длины волн ( $\pm 5X$ ) отмечены жирным шрифтом. Совпадения с линиями серии M не принимаются во внимание. Цифрами обозначен порядок отражения.

Элемент	$\begin{matrix} \searrow \\ \alpha_1 \\ \nearrow \end{matrix}$	$\begin{matrix} \searrow \\ \beta_1 \\ \nearrow \end{matrix}$	$\begin{matrix} \searrow \\ \beta_2 \\ \nearrow \end{matrix}$	$\begin{matrix} \searrow \\ \gamma_1 \\ \nearrow \end{matrix}$		
42 Mo 5394	Ir L 4 $\alpha_1$	J L 2 $\gamma_1$	Pr L 2 $\gamma_1$ La L 2 $\beta_1$	Rh L $\gamma_1$ Pb L 5 $\beta_1$	Cl K $\alpha_1$ Ce L 2 $\beta_1$ Hf L 3 $\alpha_1$	As K 4 $\alpha_2$ Ag L 1
44 Ru 4836	Co K 3 $\beta_1$ Cr 3 $\alpha_1$	Ir L 4 $\beta_1$ Cu K 3 $\alpha_1$	Sr K 5 $\alpha_1$ Mo L $\gamma_2$ La L 3 $\beta_2$	Rh L $\beta_1$ Pd L $\alpha_1$	Cd L $\eta$ Cu K 3 $\beta_1$ Os L 3 $\alpha_1$ Y K 5 $\alpha_2$	Hg L 4 $\beta_1$ Br K 4 $\alpha_2$ Cr K 2 $\beta_1$
45 Rh 4588	La L 2 $\beta_2$ Cr K 2 $\alpha_1$	Pd L $\alpha_2$ Pd L $\alpha_1$	Yk 5 $\alpha_1$ Hf L 3 $\beta_1$	Ag L $\alpha_3$	Tb L 2 $\alpha_1$ Tu L 3 $\gamma_1$ Pt L 3 $\gamma_1$ Cd L $\beta_1$	Zr K 5 $\alpha_2$ Cd L $\alpha_3$ Ag L $\beta_1$ W L 3 $\beta_2$
46 Pd 4359	Rh L $\beta_1$ Sr K 5 $\alpha_1$	Ag L $\alpha_1$ Ag L $\alpha_2$	Pr L 2 $\gamma_1$ Ru L $\gamma_2$	Rh L $\gamma_1$	Nb K 5 $\alpha_1$ Rb K 4 $\alpha_2$ Hf L 3 $\gamma_1$ Pb L 3 $\alpha_1$ Cd L $\beta_2$ Fe K 2 $\beta_1$	Hg L 3 $\gamma_1$ Te L 1 As L 3 $\alpha_1$ Sr K 4 $\alpha_2$ Os L 3 $\beta_2$
47 Ag 4146	Os L 3 $\alpha_1$ Cr K 2 $\beta_1$ Br K 4 $\alpha_1$ Wd L $\beta_1$ Th M $\alpha$	Tb L 2 $\alpha_2$ Rh L $\gamma_1$ Th M $\beta$ Cd L $\alpha_3$ Pt L 3 $\alpha_1$ Pb L 4 $\beta_1$ Pr L 2 $\gamma_1$ KK $\alpha_1$ W L 3 $\beta_2$ P L $\gamma_1$	Te L 1 Grl L 2 $\beta_1$ Rh L $\gamma_2$	Rb K 4 $\alpha_2$ Ho L 2 $\alpha_1$ Pd L 1 $\gamma$	Hf L 3 $\gamma_1$ Pb L 3 $\alpha_1$ Cd L $\beta_2$ Fe K 2 $\beta_1$	As L 3 $\alpha_1$ Sr K 4 $\alpha_2$ Os L 3 $\beta_2$
48 Cd 3948	Tb L 2 $\alpha_1$ Rh L $\gamma_1$	Er L 2 $\alpha_1$ Tb L 2 $\beta_1$ As K 3 $\alpha_2$	As K 3 $\alpha_1$ Ag L $\gamma_1$ Os L 3 $\beta_2$ In L $\beta_4$ Sn L $\beta_4$ Cd L $\gamma_1$ Se K 3 $\alpha_2$	Pb L 3 $\gamma_1$ Sr K 4 $\alpha_2$ Fe K 2 $\beta_1$	Sn L $\beta_4$ In L $\beta_2$ Se K 3 $\alpha_2$	Yb L 2 $\alpha_1$ Y K 4 $\alpha_2$ Ni K 2 $\alpha_2$
49 In 3764	Ge K 3 $\alpha_1$ Sm L 2 $\beta_2$ Nd L 2 $\gamma_1$	Er L 2 $\alpha_1$ Tb L 2 $\beta_1$ As K 3 $\alpha_2$	Sn L $\beta_4$ Cd L $\gamma_1$ Se K 3 $\alpha_2$	Yb L 2 $\alpha_1$ Y K 4 $\alpha_2$ Ni K 2 $\alpha_2$	Er L 2 $\beta_1$ Th L 4 $\beta_2$ Jl $\alpha_2$ Sn L $\beta_{11}$ Te L $\beta_2$	As K 3 $\beta_1$ Zr K 4 $\alpha_2$ Sb L $\beta_3$
50 Sn 3592	U L 5 $\beta_1$ Os L 3 $\beta_1$ Co K 2 $\alpha_2$	Tb L 2 $\beta_2$	Sb L $\beta_4$ As K 3 $\beta_1$ In L $\gamma_1$ Sc K $\alpha_1$ Er L 2 $\beta_2$ Te L $\beta_3$ Cs L $\alpha_1$ Jl $\beta_3$	Er L 2 $\beta_1$ Th L 4 $\beta_2$ Zr K 4 $\alpha_2$ Ti L 3 $\beta_2$ U L 4 $\beta_2$	Te L $\beta_2$ Nb K 4 $\alpha_2$ Sb L $\beta_{11}$ Th L 3 $\alpha_1$ Bi L 3 $\beta_1$ Cp L 2 $\beta_1$ Ma K 4 $\alpha_2$ Cd K 5 $\alpha_2$	La L 1 Ni K 3 $\beta_1$ Cs L $\eta$ Ba L $\gamma$ Mo K 4 $\alpha_2$
51 Sb 3432	KK $\beta_1$ Sm L 2 $\gamma_1$ Bi L 3 $\alpha_1$ Pt L 3 $\beta_2$	Co K 2 $\beta_1$ Cp L 2 $\alpha_1$ Au L 3 $\beta_2$ Ca K $\beta_1$ Cu K 2 $\alpha_1$ Tb L 2 $\gamma_1$	Er L 2 $\beta_2$ Te L $\beta_3$ Cs L $\alpha_1$ Jl $\beta_3$	Zn K 2 $\alpha_2$	Bi L 3 $\beta_1$ Cp L 2 $\beta_1$ Ma K 4 $\alpha_2$ Cd K 5 $\alpha_2$	Ir L 2 $\gamma_1$
52 Te 3282	Sn L $\beta_3$ Ho L 2 $\beta_1$ W L 3 $\gamma_1$	W L 2 $\alpha_1$ Yb L 2 $\beta_1$ U M $\beta$ Pb L 3 $\beta_1$ Dy L 2 $\gamma_1$ Ga K 2 $\alpha_1$ La L $\alpha_2$	Jl K $\alpha_2$ La L $\eta$	Hf L 2 $\beta_1$ Cp L 2 $\beta_2$	Cs L $\beta_1$ In K 5 $\alpha_2$ Te L $\gamma_2$ Ta L 2 $\beta_2$	Ru K 4 $\alpha_2$ Ce L $\alpha_2$ Ba L $\beta_1$
53 J 3142	In L $\gamma_1$ Sb L $\beta_3$ Hg L 3 $\beta_1$ Zr K 4 $\alpha_1$ Hf L 2 $\alpha_1$	W L 2 $\alpha_1$ Yb L 2 $\beta_1$ U M $\beta$ Pb L 3 $\beta_1$ Dy L 2 $\gamma_1$ Ga K 2 $\alpha_1$ La L $\alpha_2$	Jl K $\alpha_2$ La L $\eta$	Hf L 2 $\beta_1$ Cp L 2 $\beta_2$	Cs L $\beta_1$ In K 5 $\alpha_2$ Te L $\gamma_2$ Ta L 2 $\beta_2$	Ru K 4 $\alpha_2$ Ce L $\alpha_2$ Ba L $\beta_1$
55 Cs 2886	Te L $\beta_2$ Zn K 2 $\alpha_2$	Ga K 2 $\alpha_1$ La L $\alpha_2$	Ba L $\beta_1$ Ti K $\beta_1$	Pb L 3 $\gamma_1$ Pr L $\eta$	Hf L 2 $\gamma_1$ As K 2 $\alpha_1$	Zr K 3 $\alpha_2$ Sb K 5 $\alpha_2$

Элемент	$\sum_{\alpha_1}$	$\sum_{\beta_1}$	$\sum_{\beta_2}$	$\sum_{\gamma_1}$
	UL 4 $\beta_1$		Te L $\gamma_4$ Va K $\alpha_2$	Ge K 2 $\alpha_1$ Y K 3 $\alpha_2$
56 Ba 2770	Cu K 2 $\beta_1$ Os L 2 $\alpha_1$ Sc K $\beta_1$ Rb K 3 $\alpha_1$	Li L $\gamma_1$ Ce L $\alpha_2$ Ta L 2 $\beta_2$ W L 2 $\beta_1$ Ce L 2 $\alpha_1$ Au L 2 $\alpha_1$ Pr L $\alpha_1$	Cs L $\gamma_5$ La L $\beta_3$ Eu L 1	Tl L 2 $\alpha_1$ Nd L $\gamma$ Os L 2 $\beta_1$
57 La 2660	Ga K 2 $\alpha_1$ Cd K 5 $\alpha_1$ Cs L $\beta_4$ Hf L 2 $\beta_2$ Ta L 2 $\beta_1$		Ir L 2 $\beta_1$ Ce L $\beta_3$ Cr L $\alpha_2$	Gd L 1 Ba L $\gamma_1$ Th L 3 $\beta_1$
58 Ce 2556	Ba L $\beta_1$ Ta L 2 $\beta_2$ In L 2 $\beta_1$ W K 2 $\alpha_2$ Zn K 5 $\alpha_1$ Ba L $\beta_4$ Au L 2 $\alpha_1$ Tn K 5 $\alpha_2$	Zr K 3 $\alpha_1$ As K 2 $\alpha_2$ Hf L 2 $\gamma_1$ As K 2 $\alpha_1$ Pb L 2 $\alpha_1$ Cr L $\gamma_1$ Os L 2 $\beta_2$ Ir L 2 $\beta_2$ Va K $\beta_2$	Ba L $\gamma_7$ Pr L $\beta_3$ Se K 2 $\alpha_1$ Pt L 2 $\beta_2$	Y K 3 $\beta_1$ Sm L $\alpha_2$ La L $\gamma_5$ W L 2 $\gamma_1$
59 Pr 2458	La L $\beta_1$ Rh K 4 $\alpha_1$ Sn K 5 $\alpha_1$	U L $\beta_2$ Ge K 2 $\beta_1$ Te K 5 $\alpha_1$ Nb K 3 $\alpha_2$ Cr L $\gamma_2$ Au L 2 $\beta_1$ U 13 $\beta_1$	Ba L $\gamma_3$ Nd L $\beta_3$ As K 2 $\beta_1$ Zr K 3 $\beta_1$	Mo K 3 $\alpha_1$ Eu L $\alpha_1$ Ce L $\gamma_5$
60 Nd 2365	Th L 3 $\beta_2$ Pb L 2 $\alpha_1$ Zr K 3 $\alpha_2$ As K 2 $\alpha_2$ Hf L 2 $\gamma_1$ Pd K 4 $\alpha_2$ Ce L $\beta_1$ Th L 3 $\beta_1$ Cr K $\gamma_1$ Bi L 2 $\alpha_1$ Va K $\beta_1$ Os L $\beta_7$ Ta L 2 $\gamma_1$ Ir L 2 $\beta_2$		Os L 2 $\gamma_1$ Gd L $\alpha_1$ Ma K 3 $\alpha_2$ Tl L 2 $\beta_1$	In K 4 $\alpha_1$ La L $\gamma_3$ Ce L $\gamma_7$ Cs K 5 $\alpha_2$
61 Hf	Ce L $\beta_1$ Th L 3 $\beta_1$ Cr K $\gamma_1$ Bi L 2 $\alpha_1$ Va K $\beta_1$ Os L $\beta_7$ Ta L 2 $\gamma_1$ Ir L 2 $\beta_2$	Br K 2 $\alpha_2$ Cr K $\beta_1$ Hg L 2 $\beta_2$	Pb L 2 $\beta_1$ Sn K 4 $\alpha_1$ Th L 3 $\gamma_1$ Ce L $\gamma_3$ Ru K 3 $\alpha_2$	Sm L $\beta_3$ Pr L $\gamma_1$ Tm L $\gamma$ Ba K 5 $\alpha_2$ Fe K $\alpha_2$
62 Sm 2195	Se K 2 $\alpha_1$ Ce L $\beta_2$ Pt L 2 $\beta_2$ Ce L $\beta_{10}$ W L 2 $\gamma_1$ JK 5 $\alpha_1$	Ce L $\gamma_2$ Tb L $\alpha_2$ Se K 2 $\beta_1$	Dy L $\gamma$ Eu L $\beta_1$ Nd L $\gamma_9$ La K 5 $\alpha_2$	Yb L $\gamma$ Pr L $\gamma_{10}$ Sb K 4 $\alpha_1$
63 Eu 2116	Mo K 3 $\alpha_1$ Nd L 3 $\beta_3$ Pr L $\beta_2$ As K 2 $\beta_1$	Fe K $\alpha_3$ Dy L $\alpha_2$ Pt 2 $\gamma_1$ Th L 2 $\alpha_1$ Bi L 2 $\beta_2$ Mn K $\beta_1$	Ho L $\gamma$ U L 2 $\alpha_1$ Gd L $\beta_3$ Ma K 3 $\beta_1$	Te K 4 $\alpha_2$ Pr L $\gamma_4$ Ce K 5 $\alpha_2$ Nd L $\gamma_2$
				Sr K 3 $\beta_1$ Pb L 2 $\alpha_1$ Pd K 4 $\alpha_1$ Te K 5 $\alpha_1$ Cs L $\gamma_{10}$ Nb K 3 $\alpha_1$ Tb L 1
				Au L 2 $\beta_2$ Cd K 4 $\alpha_1$ Eu L $\alpha_2$ Pr L $\beta_{14}$
				Os L 2 $\gamma_1$ Gd L $\alpha_1$ Nd L $\beta_{14}$
				In K 4 $\alpha_1$ La L $\gamma_2$ Ma K 3 $\alpha_2$
				Pb L 2 $\beta_1$ Sn K 4 $\alpha_1$ Th L 3 $\gamma_1$ Ba K 5 $\alpha_2$
				Sm L $\beta_2$ Pr L $\gamma_2$ Eu L $\beta_6$
				Sb K 4 $\alpha_1$ La R 5 $\alpha_2$ Br K 2 $\beta_1$
				Ce K 5 $\alpha_2$ Gd L $\beta_6$ Nd L $\gamma_2$ Er L $\alpha_2$ Hg L 2 $\gamma_1$
				Te K 4 $\alpha_1$ Ma K 3 $\beta_1$ Eu L $\beta_{10}$ Co K $\alpha_2$ Tb L $\beta_4$
				Ti L 2 $\gamma_1$ Ta L $\gamma$ Gd L $\beta_7$ Ru K 3 $\beta_1$
				JK 4 $\alpha_1$ Tu L $\alpha_1$ Dy L $\beta_4$
				Ad L $\alpha_1$ Sm L $\gamma_3$ Ho L $\beta_4$ Y K 2 $\alpha_1$ Gd L $\gamma_5$
				Tb L $\beta_7$ Nd K 5 $\alpha_2$ Ni K $\alpha_1$ Rb K 2 $\beta_1$ Rh K $\beta_1$

Элемент	$\sum \alpha_1$	$\sum \beta_1$	$\sum \beta_2$	$\sum \gamma_1$	
64 Gd 2042	Os L 2 $\gamma_1$ Ce L $\gamma_1$ In K 4 $\alpha_1$ Nd L $\beta_2$	Ho L $\alpha_2$ Rh K 3 $\alpha_2$ Au L 2 $\gamma_1$ Rb K 2 $\alpha_1$ Ho L $\alpha_1$ Rh K 3 $\alpha_1$ Hg L 2 $\gamma_1$	Er L $\eta$ Sr K 2 $\alpha_1$ Fe K $\beta_2$ Tl L $\alpha_2$ J K 4 $\alpha_1$	Pd K 3 $\alpha_1$ Nd L $\gamma_4$ Tb L $\beta_3$ Tl L 2 $\gamma_1$ Sm L $\gamma_9$	Sm L $\gamma_4$ Cs K 4 $\alpha_1$ Dy L $\beta_7$ Eu L $\gamma_3$ Hf L $\alpha_2$ Cd K 3 $\alpha_1$ Er L $\beta_4$ Gd L $\gamma_9$ Th L 2 $\beta_2$ Zr K 2 $\alpha_2$
65 Tb 1972	Se K 2 $\beta_1$ Ir L 2 $\gamma_1$ Pb L 2 $\beta_1$ Sm L $\beta_3$ Sn K 4 $\alpha_1$ Pr L $\gamma_1$ Eu L $\beta_1$ Pt L 2 $\gamma_1$ Th L 2 $\alpha_1$ Bi L 2 $\beta_2$ Mn K $\beta_1$	Hg L 2 $\gamma_1$ Co K $\alpha_1$ Er L $\alpha_1$ Co K $\alpha_2$ Pd K 3 $\alpha_2$ Sm L $\gamma_1$	Tu L $\eta$ Yb L $\alpha_2$ W L l Pb L 2 $\gamma_1$	Nd K 5 $\alpha_2$ Dy L $\beta_6$ Ag K 3 $\alpha_1$	Ba K 4 $\alpha_1$ In K 3 $\alpha_1$ Tu L $\beta_1$ Th L 2 $\beta_1$ Dy L $\gamma$ Cu K $\alpha_1$ Ta L $\alpha_2$ Gd L $\alpha_3$ Hf L $\eta$
66 Dy 1905	Eu L $\beta_1$ Pt L 2 $\gamma_1$ Th L 2 $\alpha_1$ Bi L 2 $\beta_2$ Mn K $\beta_1$	Sm L $\gamma_1$	Rh K 3 $\beta_1$ Eu L $\gamma_8$ Ho L $\beta_6$ Cp L $\alpha_1$ Cd K 3 $\alpha_2$	Yb L $\eta$ Bi L 2 $\gamma_1$ Co K $\beta_1$ Cs K 4 $\alpha_2$	Er L $\beta_9$ La K 4 $\alpha_1$ Tb L $\gamma_2$ Yb L $\beta_1$ Ta L $\eta$ Tu L $\beta_2$ Au L l Ce K 4 $\alpha_1$ Cd K 3 $\beta_1$ W L $\eta$ Cp L $\beta_8$ Tb K 5 $\alpha_2$ Sb K 3 $\alpha_1$ Zr K 2 $\beta_1$ Hf L $\beta_8$ Dy K 5 $\alpha_2$ Te K 3 $\alpha_2$ In K 3 $\beta_1$ Cp L $\beta_{11}$ Nd K 4 $\alpha_1$ Bi L l J K 3 $\alpha_2$ Hf L $\beta_7$ Yb L $\gamma_5$ Th L 2 $\gamma_1$ Gd L $\gamma_4$ Y K 2 $\beta_1$ W L $\alpha_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Gd K 5 $\alpha_2$ Ho L $\gamma_5$
67 Ho 1841	Au L 2 $\gamma_1$ Rb K 2 $\alpha_1$ Gd L $\beta_1$ U L 2 $\alpha_2$ Rh K 3 $\alpha_1$	Sm L $\gamma_2$ Tb L $\beta_3$ Ni K $\alpha$ Rb K 2 $\beta_1$ Ni K $\alpha_2$	Cp L $\eta$ Hf L $\alpha_1$ Er L $\beta_7$ Gd L $\gamma_1$ Tb L $\beta_7$	Zr K 2 $\alpha_1$ Sm K 5 $\alpha_2$ Sr K 2 $\beta_1$ Pd K 3 $\beta_1$ Ba K 4 $\alpha_2$	Nd L $\gamma_4$ Hg L l Mo K 2 $\alpha_1$ Dy L $\gamma_3$ Yb L $\beta_2$ Er L $\gamma_6$
68 Er 1780	Hg L 2 $\gamma_1$ Co K $\alpha_1$ Tb L $\beta_4$ Tb L $\beta_1$ Nd L $\gamma_3$ Tl L 2 $\gamma_1$	Gd L $\gamma_1$ Eu L $\gamma_3$ Th L 2 $\beta_2$ Zr K 2 $\alpha_2$ Hf L $\alpha_2$ Cu K $\alpha_1$ In K 3 $\alpha_1$ Cu K $\alpha_3$ Ta L $\alpha_2$ Tb L $\gamma_1$ Th L 2 $\beta_1$ Ta L $\alpha_1$ Ni K $\beta_2$ Y K 2 $\beta_1$ Tb L $\gamma_2$ W L $\alpha_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Tb L $\gamma_3$ Dy L $\gamma_1$	Hf L $\eta$ Dy L $\gamma_5$ Tu L $\beta_6$ Nb K 2 $\alpha_2$	Ta L $\alpha_1$ Eu K 5 $\alpha_2$ U L 2 $\beta_2$ La K 4 $\alpha_2$ Dy L $\gamma_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Yb L $\beta_6$ Ho L $\gamma_1$ Au L l	Hf L $\beta_8$ Dy K 5 $\alpha_2$ Te K 3 $\alpha_2$ In K 3 $\beta_1$ Cp L $\beta_{11}$ Nd K 4 $\alpha_1$ Bi L l J K 3 $\alpha_2$ Hf L $\beta_7$ Yb L $\gamma_5$ Th L 2 $\gamma_1$ Dy L $\gamma_4$ Ta L $\eta$ Ho L $\gamma_4$ Ir L $\alpha_2$
69 Tu	Tl L 2 $\gamma_1$ Ta L l Sm L $\gamma_1$ Dy L $\beta_4$	Cu K $\alpha_1$ In K 3 $\alpha_1$ Cu K $\alpha_3$ Ta L $\alpha_2$ Tb L $\gamma_1$ Th L 2 $\beta_1$ Ta L $\alpha_1$ Ni K $\beta_2$ Y K 2 $\beta_1$ Tb L $\gamma_2$ W L $\alpha_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Tb L $\gamma_3$ Dy L $\gamma_1$	W L $\alpha_1$ Tb L $\gamma_3$ Ta L $\eta$ Gd K 5 $\alpha_2$ Au L l	Dy L $\gamma_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Yb L $\beta_6$ Ho L $\gamma_1$ Zr K 2 $\beta_1$	Ho L $\gamma_4$ Er L $\gamma_3$ Pt L $\alpha_1$ Ta L $\beta_3$ Sn K 3 $\beta_1$ H K 5 $\alpha_1$
70 Yb 1668	Dy L $\beta_2$ Tb L $\beta_2$ W L l Pb L 2 $\gamma_1$ Y K 2 $\alpha_2$ Eu L $\gamma_1$ Ni K $\alpha_2$ Sm L $\gamma_2$ Tb L $\beta_6$ Bi L 2 $\gamma_1$	Ni K $\beta_2$ Y K 2 $\beta_1$ Tb L $\gamma_2$ W L $\alpha_1$ Sn K 3 $\alpha_1$ Tb L $\gamma_3$ Dy L $\gamma_1$	Ce K 4 $\alpha_1$ Cd K 3 $\beta_1$ W L $\eta$ U L 2 $\beta_2$ Ho L $\gamma_1$ Tb K 5 $\alpha_2$ Er L $\gamma_5$	Tb L $\gamma_4$ Hg L l Mo K 2 $\alpha_1$ Cp L $\beta_6$ Dy L $\gamma_1$ Sb K 3 $\alpha_1$ Zr K 2 $\beta_1$	Au L $\alpha_1$ Ta L $\beta_8$ Mo K 2 $\beta_1$ Er K 5 $\alpha_1$ Er L $\gamma_4$ Tu L $\gamma_3$ W L $\beta_3$ Sm L 4 $\alpha_2$
71 Cp 1616	Dy L $\beta_2$ Ho L $\beta_3$ Co K $\beta_1$ Cd K 3 $\alpha_2$	Zn K $\alpha_1$ Tb L $\gamma_4$ Mo K 2 $\alpha_2$ Sb K 3 $\alpha_2$ Dy L $\gamma_2$ Hg L l	Cu K $\beta_2$ Dy L $\gamma_4$ Ho L $\gamma_2$ Er L $\gamma_1$ Ir L $\alpha_2$	Hf L $\beta_1$ Dy K 5 $\alpha_2$ Te K 3 $\alpha_2$ In K 3 $\beta_1$	Tu L $\gamma_4$ Rh K 2 $\alpha_1$ Tl L $\alpha_2$ Hf L $\gamma_6$ Eu K 4 $\alpha_2$ Yb L $\gamma_3$ Os L $\beta_4$ Cs K 3 $\alpha_2$ W L $\beta_{10}$

Элемент	$\sum \alpha_1$	$\sum \beta_1$	$\sum \beta_2$	$\sum \gamma_1$		
72 Hf 1566	Zr K 2 $\alpha_1$ Ho L $\beta_2$ Sr K 2 $\beta_1$ Er L $\beta_2$	W L $\gamma_1$ Vb L $\beta_2$ Ho L $\gamma_1$ Cu K $\beta_2$ Ho L $\gamma_2$ Cp L $\beta_2$ Te K 3 $\alpha_2$ Er L $\gamma_1$ Ir L $\alpha_2$	Cp L $\beta_2$ Nd K 4 $\alpha_1$ Ta L $\beta_1$ Ho L $\gamma_4$ Bi Li	Nb K 2 $\beta_1$ Ho K 5 $\alpha_2$ Pt L $\alpha_2$ Er L $\gamma_2$ Tu L $\gamma_1$	Yb L $\gamma_4$ Os L $\beta_2$ Pd K 2 $\alpha_2$ Ir K $\beta_2$ Gd K 4 $\alpha_2$	Cp L $\gamma_2$ As K $\alpha_2$ Pb L $\alpha_1$ Ta L $\gamma_5$ Ba K 3 $\alpha_2$
72 Ta 1518	Cu K $\alpha_3$ In K 3 $\alpha_1$ Tb L $\gamma_3$ Th L $\beta_1$ Er L $\beta_2$	Nb K 2 $\beta_1$ Hf L $\beta_2$ Pt L $\alpha_2$ Er L $\gamma_2$ Bi Li	W L $\beta_2$ Ru K 2 $\alpha_1$ Zn K $\beta_2$ Tu L $\gamma_2$	Au L $\alpha_2$ Er K 5 $\alpha_2$ Er L $\gamma_4$	Ru K 2 $\beta_1$ Cp L $\gamma_4$ Os L $\beta_2$ Hf L $\gamma_3$ W L $\gamma_5$ Tl L $\gamma_1$ La K 2 $\alpha_2$ Ir L $\beta_1$ Pt L $\beta_2$ Ta L $\gamma_3$ Pb L $\gamma_1$ Ce K 3 $\alpha_2$	Bi L $\alpha_1$ Pt L $\beta_2$ Ir L $\beta_2$ Tb K 4 $\alpha_2$ Ge K $\beta_1$ Ag K 2 $\alpha_2$ Se K $\alpha_1$ Hf K $\gamma_4$ Dy K 4 $\alpha_2$ Rh K 2 $\beta_1$
74 W 1473	Ni K $\beta_2$ Tb L $\gamma_2$ Yb L $\beta_1$ Sn K 2 $\alpha_1$ Dy L $\gamma_1$	Au L $\alpha_2$ Ru K 2 $\alpha_1$ Ta L $\beta_2$ Zn K $\beta_2$ Au L $\alpha_1$ Yb L $\gamma_1$ W L $\beta_2$ Pt L $\gamma_1$ Hg L $\alpha_1$ W L $\beta_2$ Rh K 2 $\alpha_2$ Yb L $\gamma_2$ U L 2 $\gamma_1$	Ge K $\alpha_1$ Ta L $\beta_2$ Hg L $\alpha_1$ Sm K 4 $\alpha_1$	Sb K $\beta_1$ Pt L $\gamma_1$ Rh K 2 $\alpha_2$	Ir L $\beta_1$ Pt L $\beta_2$ Ta L $\gamma_3$ Pb L $\gamma_1$ Ce K 3 $\alpha_2$	Se K $\alpha_1$ Hf K $\gamma_4$ Dy K 4 $\alpha_2$ Rh K 2 $\beta_1$
75 Re 1430	Cp L $\beta_4$ U L 2 $\beta_1$ Zn K $\alpha_1$ Ce K 4 $\alpha_1$ Mo K 2 $\alpha_2$ Sb K 3 $\alpha_2$ Dy L $\gamma_2$ Hg Li W L $\gamma_1$	W L $\beta_2$ Pt L $\gamma_1$ Hg L $\alpha_1$ W L $\beta_2$ Rh K 2 $\alpha_2$ Yb L $\gamma_2$ U L 2 $\gamma_1$	Hf L $\gamma_5$ Tl L $\alpha_1$ Yb K 5 $\alpha_2$ Au L $\gamma_1$ Te K 3 $\beta_1$	Eu K 4 $\alpha_2$ Os L $\beta_2$ W L $\beta_2$ Cs K 3 $\alpha_1$	Hg L $\beta_4$ Au L $\beta_2$ W K 5 $\alpha_2$ Ta L $\gamma_4$ Ho K 4 $\alpha_2$ Pt L $\beta_{10}$ Tl L $\beta_6$	Ce K 3 $\alpha_1$ Cd K 2 $\alpha_1$ U Li W L $\gamma_3$ Bi L $\gamma_1$ As K $\beta_1$
76 Os 1388	Cp L $\beta_2$ Cu K $\beta_1$	Ga K $\beta_1$ Tl L $\alpha_1$ Au L $\gamma_1$ Pb L $\alpha_2$ Cs K 3 $\alpha_1$ Os L $\beta_2$ Pb K 2 $\alpha_1$ Ba K 3 $\alpha_1$ Hg L $\gamma_1$ Bi L $\alpha_2$ Ru K 2 $\beta_2$	Cp L $\gamma_3$ As K $\alpha_1$ Ir L $\beta_2$ Gd K 4 $\alpha_2$ Ba K 3 $\alpha_2$ Ru K 2 $\beta_1$ Cp L $\gamma_4$ Pt L $\beta_4$ Ta L $\gamma_1$ W L $\gamma_5$ Tl L $\gamma_1$ La K 3 $\alpha_2$	Hf L $\gamma_1$ Pb L $\alpha_1$ Ta L $\gamma_1$ Pd K 2 $\alpha_1$ Hg L $\gamma_1$ Bi L $\alpha_1$ Os L $\beta_2$ Hf L $\gamma_3$ Tb K 4 $\alpha_2$ Ge K $\beta_1$ Ag K 2 $\alpha_2$	Hg L $\beta_2$ Er K 4 $\alpha_2$ In K 2 $\alpha_1$ Au L $\beta_2$	Ir L $\beta_2$ W L $\gamma_4$ Pb L $\beta_2$ Tl L $\beta_1$
77 Ir 1349	Hf L $\beta_2$ Pb Li Ta L $\beta_4$ Ga K $\alpha$	Os L $\beta_2$ Pb K 2 $\alpha_1$ Ba K 3 $\alpha_1$ Hg L $\gamma_1$ Bi L $\alpha_2$ Ru K 2 $\beta_2$	Cp L $\gamma_4$ Pt L $\beta_4$ Ta L $\gamma_1$ W L $\gamma_5$ Tl L $\gamma_1$ La K 3 $\alpha_2$	Bi L $\alpha_1$ Os L $\beta_2$ Hf L $\gamma_3$ Tb K 4 $\alpha_2$ Ge K $\beta_1$ Ag K 2 $\alpha_2$	Hg L $\gamma_1$ Ag K 2 $\beta_1$ Se K $\beta_1$ Sn K 2 $\alpha_2$ Pb L $\beta_1$	Nd K 3 $\alpha_1$ Bi L $\beta_2$ Tl L $\beta_1$ Pt L $\gamma_5$
78 Pt 1310	Bi Li Er L $\gamma_3$ J K 3 $\alpha_1$ Ta L $\beta_2$ Th L 2 $\gamma_1$ W L $\beta_4$	Ir L $\beta_2$ Ge K $\beta_1$ Tl L $\gamma_1$ Ia K 3 $\alpha_1$ Ag K 2 $\alpha_1$ Th Li Au L $\beta_2$ Ta L $\gamma_6$ Se K $\alpha_2$	U Li Au L $\beta_1$ Ta L $\gamma_2$ Hf L $\gamma_4$ Pb L $\gamma_1$	La K 3 $\alpha_1$ Ir L $\beta_2$ Se K $\alpha_1$ Dy K 4 $\alpha_2$ Rh K 2 $\beta_1$	Yb K 4 $\alpha_2$ Ir L $\gamma_3$ Th L $\alpha_1$ Pt K 5 $\alpha_2$ Sb K 2 $\alpha_2$	Pb L $\beta_7$ Au L $\gamma_5$ Bi L $\beta_2$ Cd L 2 $\beta_1$
79 Au 1274	Ru K 2 $\alpha_1$ Zn K $\beta_2$	Rh K 2 $\beta_1$ Ce K 3 $\alpha_2$	Dy K 4 $\alpha_1$ Hg L $\beta_4$	Pt L $\beta_5$ Ce K 3 $\alpha_1$	Br K $\beta_1$ Sm K 3 $\alpha_1$	Pt L $\gamma_3$ Rb L $\alpha_1$

Элемент	$\sum \alpha_1$	$\sum \beta_1$	$\sum \beta_2$	$\sum \gamma_1$		
80 Hg 1239	W $L\beta_1$ Ta $L\beta_3$ Yb $L\gamma_1$ Mo $K 2\beta_1$ W $K\beta_2$ Pt $L\gamma$ Rh $L 2\alpha_2$	Pt $L\beta_7$ Hg $L\beta_{11}$ Cd $K 2\alpha_2$  As $K\beta_1$ Ti $L\beta_9$ Au $L\beta_7$ Br $K\alpha_2$ Pd $K 2\beta_1$ Os $L\gamma_1$ In $K 2\alpha_1$ Pb $L\beta_8$ Ti $L\beta_1$ Hg $L\beta_7$ Pd $K 3\alpha_2$	Cd $K 2\alpha$ W $L\gamma_2$ Ta $L\gamma_4$ As $K\beta_1$ W $K 4\alpha_1$ Ho $K 4\alpha_1$ Au $L\beta_6$ Ti $L\beta_1$ Er $K 4\alpha_2$ In $K 2\alpha_1$ Hg $L\beta_5$ Er $K 4\alpha_1$	W $K 5\alpha_2$ U $L I$ Bi $L\gamma$  As $K\beta_2$ Pd $K 2\beta_1$ Br $K\alpha_1$ In $L 2\alpha_1$ W $L\gamma_4$ Au $L\beta_2$ Nb $K 3\alpha_2$ Pb $L\beta_4$	Bi $L\beta_5$ W $K 5\beta_1$ Hg $L\gamma_3$  U $L\alpha_1$ Te $K 2\alpha_1$ Bi $L\beta_9$ Eu $K 3\alpha_1$  Sr $K\alpha_1$ Sn $K 2\beta_1$ J $K 2\alpha_1$ Gd $K 3\alpha_1$	Pb $L\beta_9$ U $L\alpha_2$  In $K 2\beta_1$ Au $L\gamma_3$ Ti $L\gamma_5$  Hg $L\gamma_2$ Au $L\gamma_4$ Pb $L\gamma_5$ W $K 4\alpha_2$
81 Tl 1205	Ga $K\beta_1$ Cs $K 3\alpha_2$ Os $L\beta_1$ W $L\beta_3$ Au $L\gamma$	Os $L\gamma_1$ In $K 2\alpha_1$ Pb $L\beta_8$ Ti $L\beta_1$ Hg $L\beta_7$ Pd $K 3\alpha_2$	In $K 2\alpha_1$ Hg $L\beta_5$ Er $K 4\alpha_1$	Nb $K 3\alpha_2$ Pb $L\beta_4$	Sr $K\alpha_1$ Sn $K 2\beta_1$ J $K 2\alpha_1$ Gd $K 3\alpha_1$	Hg $L\gamma_2$ Au $L\gamma_4$ Pb $L\gamma_5$ W $K 4\alpha_2$
82 Pb 1173	Cp $L\gamma_3$ Ba $K 3\alpha_2$ Os $L\beta_3$ Hf $L\gamma_1$ Ir $L\beta_4$ As $K\alpha_1$ Ta $L\gamma_5$ Pd $K 2\alpha_1$ Ru $K 2\beta_1$ Os $L\beta_7$ Pt $L\beta_4$ Ir $L\beta_3$ Ta $L\gamma_1$	Se $K\beta_1$ Ag $K 2\beta_1$ Ir $L\gamma_1$ Pt $L\gamma_5$ Sn $K 2\alpha_1$ Ti $L\beta_3$ Bi $L\beta_4$  Ir $L\gamma_3$ Pt $L\gamma_1$ Au $L\gamma_5$ Th $L\alpha_1$ Pb $L\beta_5$ Cd $K 2\beta_1$ Sd $K 2\alpha_2$ Ba $K 2\alpha_1$ J $K 2\beta_1$ Sr $K\beta_2$ La $K 2\alpha_2$ Nb $K\alpha_2$	Ag $K 2\beta_1$ Pt $L\gamma_5$ Ir $K 5\alpha_2$ Se $K\beta_2$	Ir $L\gamma_1$ Sn $K 2\alpha_2$ Ti $L\beta_5$ Bi $L\beta_4$	Bi $L\gamma_5$ Hg $L\gamma_4$ Sb $K 2\beta_1$ Rb $K\beta_1$	Tl $L\gamma_3$ W $K 4\alpha_1$ Y $K\alpha_2$ Th $L\beta_6$
83 Bi	Ru $K 2\beta_1$ Os $L\beta_7$ Pt $L\beta_4$ Ir $L\beta_3$ Ta $L\gamma_1$	Ir $L\gamma_3$ Pt $L\gamma_1$ Au $L\gamma_5$ Th $L\alpha_1$ Pb $L\beta_5$ Cd $K 2\beta_1$ Sd $K 2\alpha_2$ Ba $K 2\alpha_1$ J $K 2\beta_1$ Sr $K\beta_2$ La $K 2\alpha_2$ Nb $K\alpha_2$	Ir $L\gamma_3$ Au $L\gamma_5$ Pt $K 5\alpha_2$ Cd $K 2\beta_1$	Pt $L\gamma_1$ Th $L\alpha_1$ Po $L\beta_3$ Sb $K 2\alpha_2$	Rb $K\beta_2$ Ti $L\gamma_4$	Pb $L\gamma_3$ U $L\gamma$
90 Th 954	Ir $L\gamma_3$ Pt $L\gamma_1$ Au $L\gamma_5$ Bi $L\beta_2$ Pb $L\beta_3$ Cd $K 2\beta_1$ Sb $K 2\alpha_2$	Ce $K 2\alpha_2$ Mo $K\alpha_2$ Zr $K\beta_1$	Te $K 2\beta_1$ U $L\beta_6$ Pb $L\gamma_4$ Sr $K\beta_1$	Zr $K\alpha_2$ Bi $L\gamma_6$ Ir $K 4\alpha_2$	Nb $K\beta_1$ Nb $K\beta_2$ W $K 2\alpha_2$	Pt $K 4\beta_1$ Ru $K\alpha_2$
92 U 909	Bi $L\beta$ Br $K\beta_2$ Te $K 2\alpha_2$ Au $\gamma_2$	Ce $K 2\alpha_2$ Mo $K\alpha_2$ Zr $K\beta_1$	Th $K\beta_6$ Th $L\beta_2$ Pt $K 4\alpha_1$	Bi $L\gamma_4$ Nd $K\alpha_2$ Y $K\beta_1$	W $K 3\alpha_2$ Rh $K\alpha_1$	Mo $K\beta_2$



### § 3. Количественный анализ

Для определения весовой доли элемента в каком-либо веществе можно пользоваться как спектром испускания, так и спектром поглощения. Спектр поглощения легче приводит к цели, но по техническим причинам применение его ограничивается анализом тяжелых элементов. Особенно благоприятен случай включения тяжелого элемента в состав вещества, содержащего легкие элементы. Анализ с помощью спектра испускания применим к меньшим количествам вещества и при сравнении с соседними элементами приводит к хорошим результатам, особенно при наличии соединений с высокой температурой испарения.

Общее применение этого метода без контрольных определений может привести к значительным ошибкам.

Так называемая интенсивность линий или степень почернения фотопленки в местах проникновения лучей, так же как и интенсивность самих лучей, не пропорциональна процентному содержанию элемента в препарате по следующим причинам.

1) Вследствие различия в испускательной способности различных атомов вовсе несравнимы интенсивности линий различных серий, например  $L_{\alpha}$  и  $K_{\alpha}$ , так как условия возбуждения их различны. Отношения интенсивностей линий одной и той же серии разных элементов изменяются в зависимости от напряжения генерирования, поскольку интенсивность характеристического излучения зависит от разности между этим напряжением и потенциалом возбуждения серии. (Необходимо поэтому выбирать напряжение генерирования по возможности большим, по крайней мере в два раза больше, чем наиболее высокий потенциал возбуждения). Для практических целей допустимо считать, что при одинаковых условиях возбуждения соседние элементы обладают более или менее одинаковой испускательной способностью.

2) Вследствие различия в ослаблении характеристического излучения атомов внутри препарата.

Весовая доля элемента с более жестким характеристическим излучением легко может быть преувеличена, так как поглощение в слое препарата будет менее сказываться, и электроны катодного пучка больших скоростей глубже проникают в препарат.

Эта ошибка ослабляется (а в некоторых случаях может привести к обратному результату) тем, что характеристическое излучение более тяжелого элемента возбуждает характеристическое излучение более легкого. Таким образом, для интенсивностей линии не безразлично, в какой смеси или в каком химическом соединении входит определяемый элемент.

Для устранения мешающего влияния материала анода полезно пользоваться серебряным анодом при напряжениях генерирования меньших 25 kV.

3) Вследствие изменения состава препарата при различной скорости испарения составных частей.

Интенсивность характеристического излучения летучих элементов убывает во времени, что ведет к преуменьшенному суждению о процентном содержании этих элементов.

4) Вследствие различия чувствительности фотографических пленок или пластин к лучам различного качества и различной интенсивности.

Интенсивность линий (почернение) не пропорциональна интенсивности лучей. Лучи с большей длиной волны дают относительно большее почернение (различие в поглощении).

Однако при одинаковом времени освещения почернение фотопленки от лучей одной и той же длины волны, но различной интенсивности, может быть также различно, поскольку нет прямой пропорциональности между плотностью почернения и количеством поглощенной чувствительным слоем энергии лучей (при  $S > 1,0$ ).

Фотографическая пленка не в состоянии правильно передать отношение интенсивностей, если оно больше, чем 10:1.

При измерении интенсивности линий ионизационным методом, при известной длине волны, всегда возможен переход от измеренной мощности физической дозы к интенсивности лучей по соотношению

$$I = \frac{P}{\gamma}$$

Изменение силы анодного тока трубки не изменяет отношение интенсивностей спектральных линий характеристического излучения данного химического соединения, но это отношение не пропорционально весовым количествам соответствующих элементов.

Анализ спектром поглощения базируется на определении величины скачка поглощения. Согласно Глокеру и Фронмейеру

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_0 e^{-\left(\frac{\mu_2}{\rho}\right) \rho \cdot x}}{I_0 e^{-\left(\frac{\mu_1}{\rho}\right) \rho \cdot x}} = e^{-\rho \cdot x \left(\frac{\mu_2}{\rho} - \frac{\mu_1}{\rho}\right)} = e^{-c \cdot \rho}$$

где  $I_2$  и  $I_1$  — интенсивности участка непрерывного спектра, отвечающего краю полосы поглощения позади слоя  $x$ ,  $\rho = \rho \cdot x$  — масса вещества, пронизываемого пучком лучей сечением в  $см^2$ , измеряемая в  $г/см^2$ , и  $c$  — разность значения массового коэффициента поглощения до и после границы скачка поглощения.

Таблица 64

Числовые значения констант  $c$

Элемент	Граница полосы поглощения $K$	Граница полосы поглощения $L$
42 Mo	60	—
47 Ag	45	—
50 Sn	34	—
51 Sb	31	—
56 Ba	24	—
58 Ce	22,5	—
74 W	8	—
82 Pb	5,7	—
90 Th	3,2	50
92 U	—	45

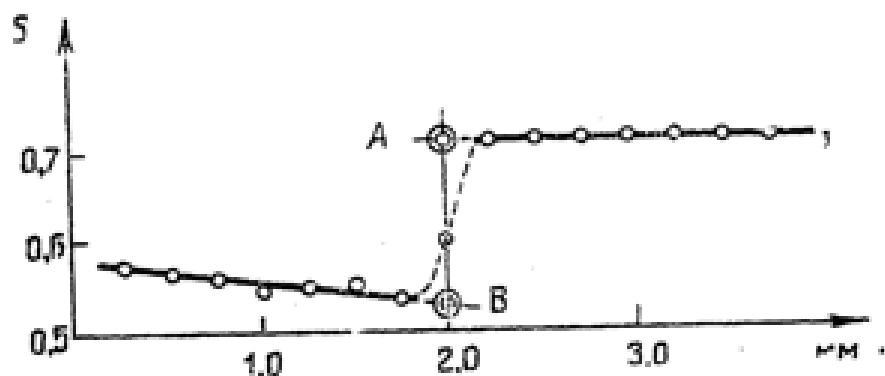


Рис. 60. Метод определения величины скачка поглощения фотометрическим путем ( $\mu, \mu$  — по спектрограмме).

Таблица 65

Минимальное количество вещества (в  $\text{мг}/\text{см}^2$ ), необходимое для получения сколько-нибудь заметного скачка поглощения

(разница интенсивности с обеих сторон границы 5%)

Элемент	Граница полосы поглощения $K$	Граница полосы поглощения $L$
Mo	0,7	—
Ag	1,1	—
Sn	1,5	—
Sb	1,6	—
Ba	2,1	—
Ce	2,2	—
W	6,3	—
Pb	9,0	—
Th	16,0	1,0
U	—	1,1

Масса вещества  $p$ , просвеченная пучком сечением в  $\text{см}^2$ , получается путем измерения площади освещения и взвешиванием.

Испытуемое вещество может быть в твердом или жидком состоянии и помещается в месте наименьшего сечения пучка сразу за щель спектрографа.

Жидкий, а также порошкообразный материал помещается в резиновой кюветке или для получения тонких слоев засасывается фильтровальной бумагой.

Величина скачка поглощения не зависит от напряжения генерирования до значения  $U = 2U_K$  или  $U = 2U_L$ .

Для элементов с  $Z < 42$  (Mo) анализ поглощением применять затруднительно, вследствие сильного поглощения лучей в препарате ( $\lambda_x > 0,6 \text{ \AA}$ ).

Измерение интенсивностей производится по ионизационному или фотографическому действию лучей, и путем экстраполяции находят значения  $I_2$  и  $I_1$ , отвечающие границе поглощения. (Указанные выше пределы применимости анализа поглощением могут быть расширены путем применения счетных трубок Гейгер-Мюллера).

Время экспозиции при фотографическом методе измерений обычно несколько часов.

Применение усилительных экранов нежелательно, так как в этом случае кривая почернений не будет прямолинейной.

Точность рентгеновского анализа поглощением при малых количествах вещества не уступает химическому анализу, особенно в случаях определения химически родственных и потому трудно отделимых элементов.

Наиболее благоприятным для рентгеновского анализа является случай определения содержания более тяжелого элемента в смеси с легким.

## § 4. Анализ структуры вещества

Методы спектрального анализа позволяют установить род и число атомов, входящих в состав вещества, независимо от характера их химического соединения.

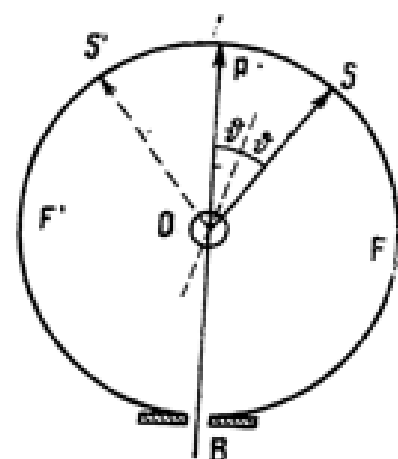


Рис. 61. Принцип метода Дебай-Шеррер.

В аморфных веществах атомы и молекулы расположены беспорядочно, в кристаллах — закономерно в некоторой пространственной решетке.

Методы интерференции для кристаллических тел позволяют судить о характере химической связи, так как каждому элементу и каждому химическому соединению соответствуют определенные пространственные решетки.

Все металлы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение. Для применения метода интерференций необходимо наличие кристалликов размерами не менее  $10^{-7}$  см.

Исследование структуры поликристаллически тел (большинство технических материалов) включает в себя следующие задачи: а) установление типа кристаллической решетки, б) определение величины отдельных кристаллов, в) установление взаимного расположения кристаллов, г) обнаружение деформаций решетки.

Исследование монокристаллов ограничивается п. „а“.

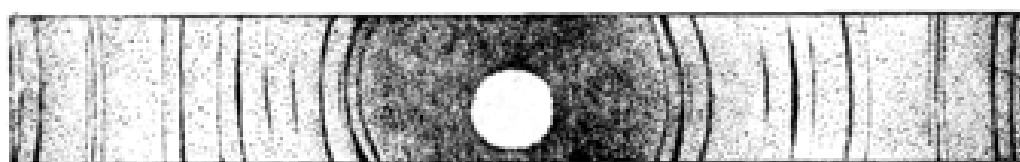
### а) Метод Дебай - Шеррер для поликристаллических агрегатов

Принципиальная схема метода показана на рис. 61. Вид рентгенограммы дан на рис. 62. Лучи однородные. Используется характеристическое излучение анода серии К. Для выделения отдельной линии и ослабления непрерывного спектра употребляются фильтры.

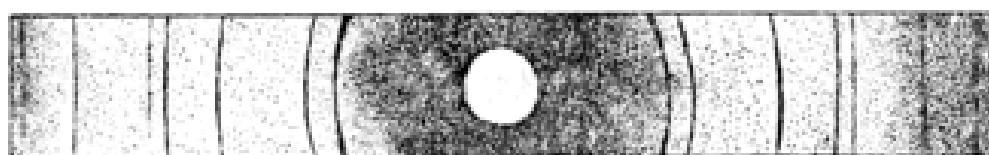
Таблица 66

Наименований материалов фильтров для выделения  $K_{\alpha}$ -линии различных элементов

Элемент	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Rh	Pd	Ag	W	Pt
$\lambda$ в Å $K_{\alpha}$ -линии	2,29	2,10	1,93	1,66	1,54	1,43	0,709	0,614	0,586	0,560	0,211	0,188
Материал. фильтра	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zr	Ru	Ru Rh	Rh Pd	Yb Hf	W Os



1



2

Рис. -62. Рентгенограмма алюминия (анод — медь):  
1) без никелевого фильтра, 2) с никелевым фильтром.

Таблица 67

### Фильтры для получения однородного излучения

Вещество антикатода	Наимень- шее на- пряже- ние в kV	Наиболее ин- тенсивная дли- на волны характ. излу- чения	Вещество фильтра	Толщина фильтра	Колич. вещества на см <sup>3</sup>
Хром . . . . .	6	2,287 Å	Ванадий	—	—
Железо . . . . .	7	1,985 "	Марганец	0,005 мм	0,004 г
Медь . . . . .	9	1,539 "	Никель	0,007 "	0,0067 "
Молибден . . . . .	20	0,710 "	Цирконий	0,03 "	0,020 "
Серебро . . . . .	25	0,560 "	Палладий	0,03 "	0,036 "

Применяемое излучение, по возможности, не должно возбуждать характеристического излучения исследуемого вещества ( $\lambda_{\kappa}$  анода  $>$   $\lambda_{\kappa}$  вещества) во избежание вуали на пленке (обычно анодом служит Си или Fe). В случае  $\lambda_{\kappa}$  — анода  $<$   $\lambda_{\kappa}$  — вещества (анод Mo) фотографическую пленку закрывают алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм. Напряжение генерирования выбирается равным (1,5 — 2,0)  $U_{\kappa}$ . Положение колец на рентгенограмме зависят от структуры кристалла и длины волны лучей.

Плотность почернения зависит от интенсивности лучей, экспозиции (числа миллиамперчасов) и угла отражения  $\theta$ . Кольца зачернены равномерно, если кристаллики в исследуемом веществе расположены беспорядочно и имеют линейные размеры не более  $10^{-3}$  см, или кристаллики ориентированы, но освещение производится в направлении оси текстуры.

Ось текстуры называется направление, вдоль которого преимущественно расположены определенные кристаллографические направления кристалликов.

Диаметр кольца ( $2r$ ) на рентгенограмме связан с диаметром камеры ( $2R$ ) соотношением:

$$2r = 2R \cdot \operatorname{arcsin} \theta.$$

Ширина кольца меньше диаметра столбика образца ( $2\rho$ ) и зависит от поглощения лучей в испытуемом веществе и угла отражения  $\theta$ .

Поправки на поглощение:

Наружный диаметр  $2 r_n$ ; исправленный диаметр  $2 r$ .

$$2 r = 2 r_n - 2 \rho \text{ (Хаддинг).}$$

Средний диаметр  $2 r_0$

$$2 r = 2 r_0 - \rho [1 + (\cos 2\theta)] \text{ (Хаддинг).}$$

Внутренний диаметр  $2 r_i$ :

$$2 r = 2 r_i - 2 \varepsilon \rho \cos 2\theta \text{ (Отт),}$$

где  $\varepsilon = 0,6 - 0,1$ , возрастающая с увеличением поглощения.

Измерения производятся по средней части пленки.

Для повышения точности определения  $2 r$  к испытуемому веществу при-  
мешивается другое, с известной решеткой, кольца которого служат образ-  
цовыми.

Разрешающая способность  
или расстояние между двумя  
кольцами на пленке при дан-

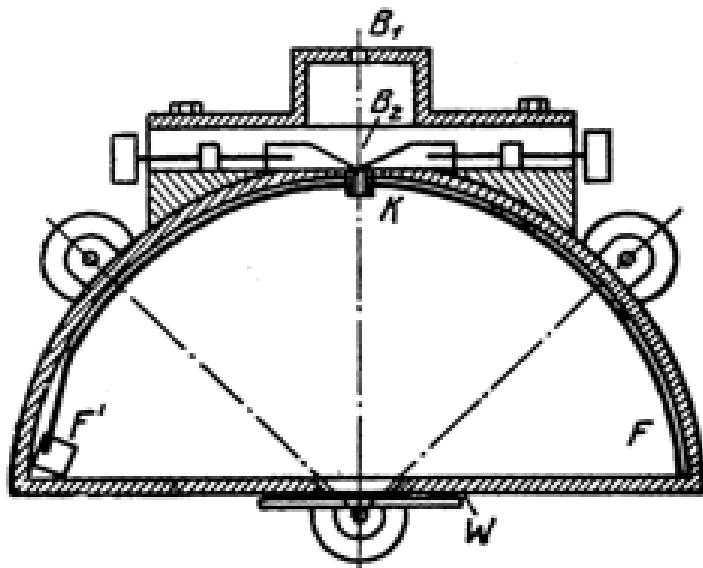


Рис. 63. Камера по Делингеру.

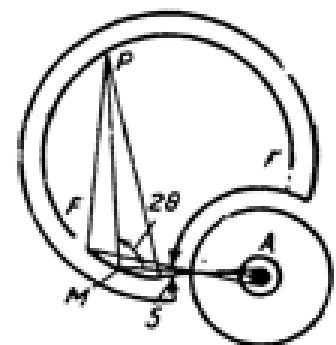


Рис. 64. Камера Зеэман-Болин.

ном процентном различии постоянных решетки или длин волн увеличивается  
с увеличением угла отражения  $\theta$ :

$$\Delta r = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} 2 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Для специальных целей применяются различные видоизменения метода Де-  
бай-Шеррера. Например Делингер (рис. 63): большая разрешающая способ-  
ность, так как при  $2\theta$ , близком к  $180^\circ$ ,  $\Delta r$  — особенно велико.

Зеэман-Болин (рис. 64): большая интенсивность лучей (препарат ближе  
к трубке), (большая разрешающая способность, отсчет диаметра  $2 r$  без по-  
правок

$$r = 2 \cdot R \cdot \operatorname{arcs} 2\theta, \quad \Delta r = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 4 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Недостатки: ограниченность углового интервала.

Расшифровка рентгенограмм.

Вещество имеет кристаллическое строение, если на рентгенограмме  
имеются резко очерченные кольца.

Два вещества имеют одинаковую кристаллическую структуру, если кольца  
на рентгенограммах, снятых на одном и том же излучении и в одной и  
той же камере, могут быть приведены к совпадению.

Аморфное тело, твердое или жидкое, дает на рентгенограмме одно или два диффузных размытых кольца, обусловленных правильным расположением атомов в молекулах при беспорядочной ориентировке последних или же образованием молекулярных агрегатов. В последнем случае ширина колец может быть использована для определения степени полимеризации органических веществ.

При одинаковом химическом составе различное расположение колец указывает на явление изомерии.

Появление неискаженной системы колец некоторого вещества указывает на механическое включение его в исследуемый препарат.

После нахождения исправленных значений диаметров колец ( $2r$ ) определяются углы отражения  $\theta$  и по ним вычисляется  $\sin^2 \theta$ .

Находится плотность почернения колец. Если излучение не вполне однородно, например, присутствуют лучи длин волн  $\lambda_\alpha$  и  $\lambda_\beta$  серии  $K$ , то в простых случаях исключаются все лишние кольца, так как при неизменном значении  $d$

$$\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_\beta} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}.$$

Для описания пространственной решетки необходимо определить форму и размеры элементарной ячейки (длины ребер и углы между ними), число атомов в каждой ячейке и найти координаты каждого атома в долях соответствующих ребер ячейки.

Определение элементарной ячейки эквивалентно нахождению кристаллической системы, причем направления ребер ячейки совпадают с направлением кристаллографических осей соответствующих шести кристаллических систем (кубическая, тетрагональная, гексагональная, ромбическая, моноклинная и триклинная).

Расстояние  $d$  между соседними кристаллическими плоскостями с индексами  $(h, k, l)$  в общем случае триклинной решетки выражается формулой (см. кристаллографические формулы):

$$\frac{1}{d^2} = f_1 \cdot h^2 + f_2 \cdot k^2 + f_3 \cdot l^2 + f_4 \cdot h \cdot k + f_5 \cdot k \cdot l + f_6 \cdot h \cdot l,$$

где  $f_1, f_2 \dots$  и т. д. — коэффициенты, зависящие от длины осей и углов между ними (квадратичная форма). Для отражения первого порядка  $n=1$  и значит

$$\lambda \approx 2 \cdot d \cdot \sin \theta.$$

Отсюда

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} (f_1 \cdot h^2 + f_2 \cdot k^2 + f_3 \cdot l^2 + f_4 \cdot h \cdot k + f_5 \cdot k \cdot l + f_6 \cdot h \cdot l).$$

По известному значению  $\lambda$  и найденному из рентгенограммы  $\sin^2 \theta$  необходимо подобрать кристаллическую систему, для которой удовлетворяется написанное соотношение.

Графический метод Галла и Девей позволяет непосредственное нахождение кристаллической системы и индексов плоскостей, отвечающих кольцам на рентгенограмме для кубической тетрагональной и гексагональной систем (с ромбоэдрическим подотделом), так как в квадратичную формулу для этих систем входят лишь два коэффициента.

Для этой цели, по данным структурных таблиц, для указанных систем строятся кривые  $\frac{f_2}{f_1}$ , в зависимости от логарифма расстояния между соседними кристаллическими плоскостями ( $\lg d$ ) (рис. 65, 66, 67, 68, 69). Задача сводится таким образом к тому, чтобы с помощью этих кривых найти горизонтальную прямую, для которой отношение  $d_1 : d_2 : d_3 \dots$  совпадало с зна-

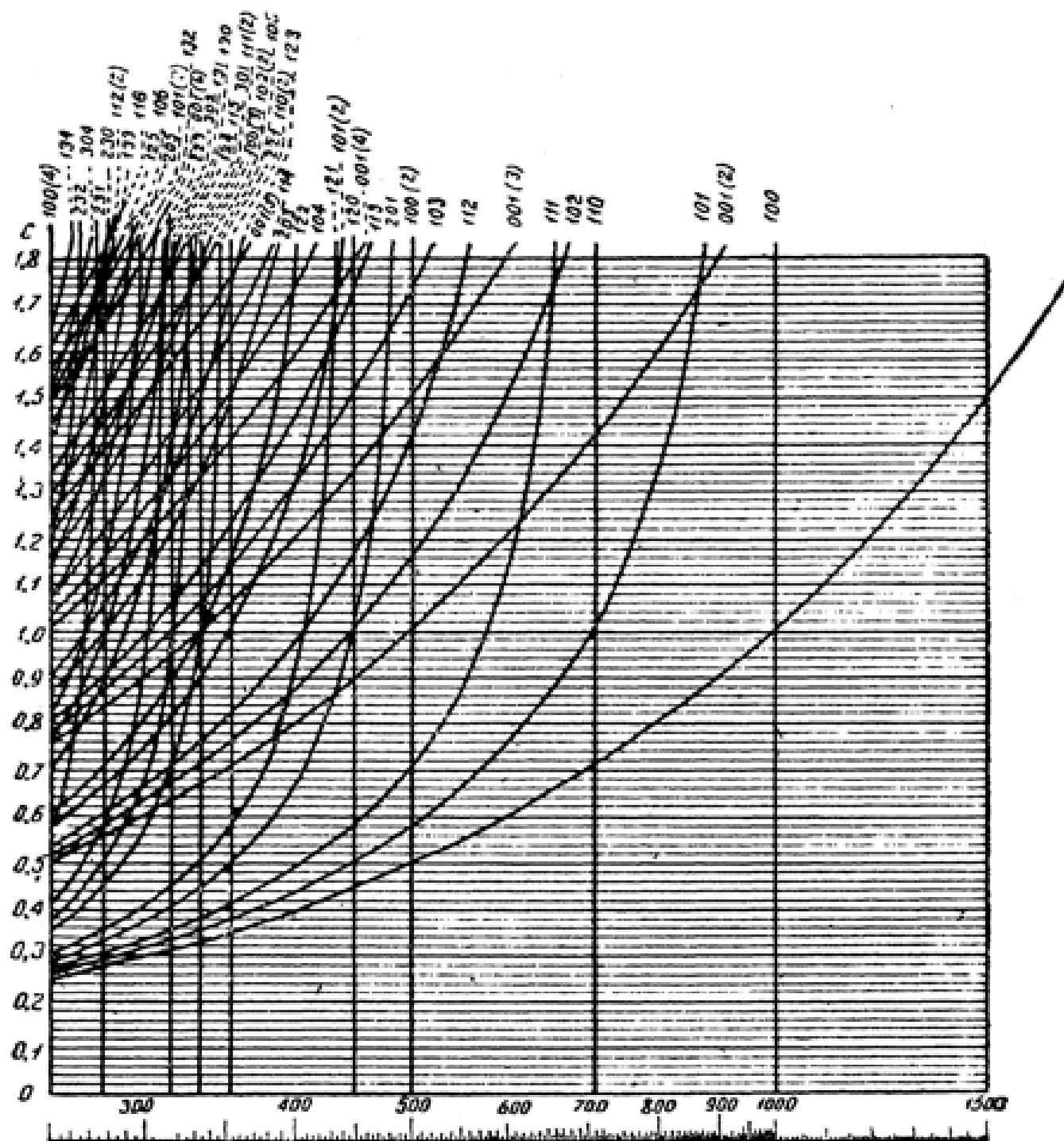


Рис. 65. Кривые Галла для тетрагональной системы.

чениями тех же отношений  $\frac{d_1}{d_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$ , найденными путем измерения колец рентгенограммы.

По найденному типу решетки, индексам и коэффициентам находят длины ребер ячейки.

С увеличением индексов плоскостей расстояние между линиями на диаграммах Галла настолько сокращается, что точные определения в этой об-



ласти затруднительны, почему решающее значение имеют линии с малыми индексами, соответствующие внутренним кольцам на рентгенограмме.

Определение кристаллической структуры на основании одних только рентгенограм Дебая возможно лишь для решетки кубической, тетрагональной и гексагональной систем, так как в случае остальных кристаллических

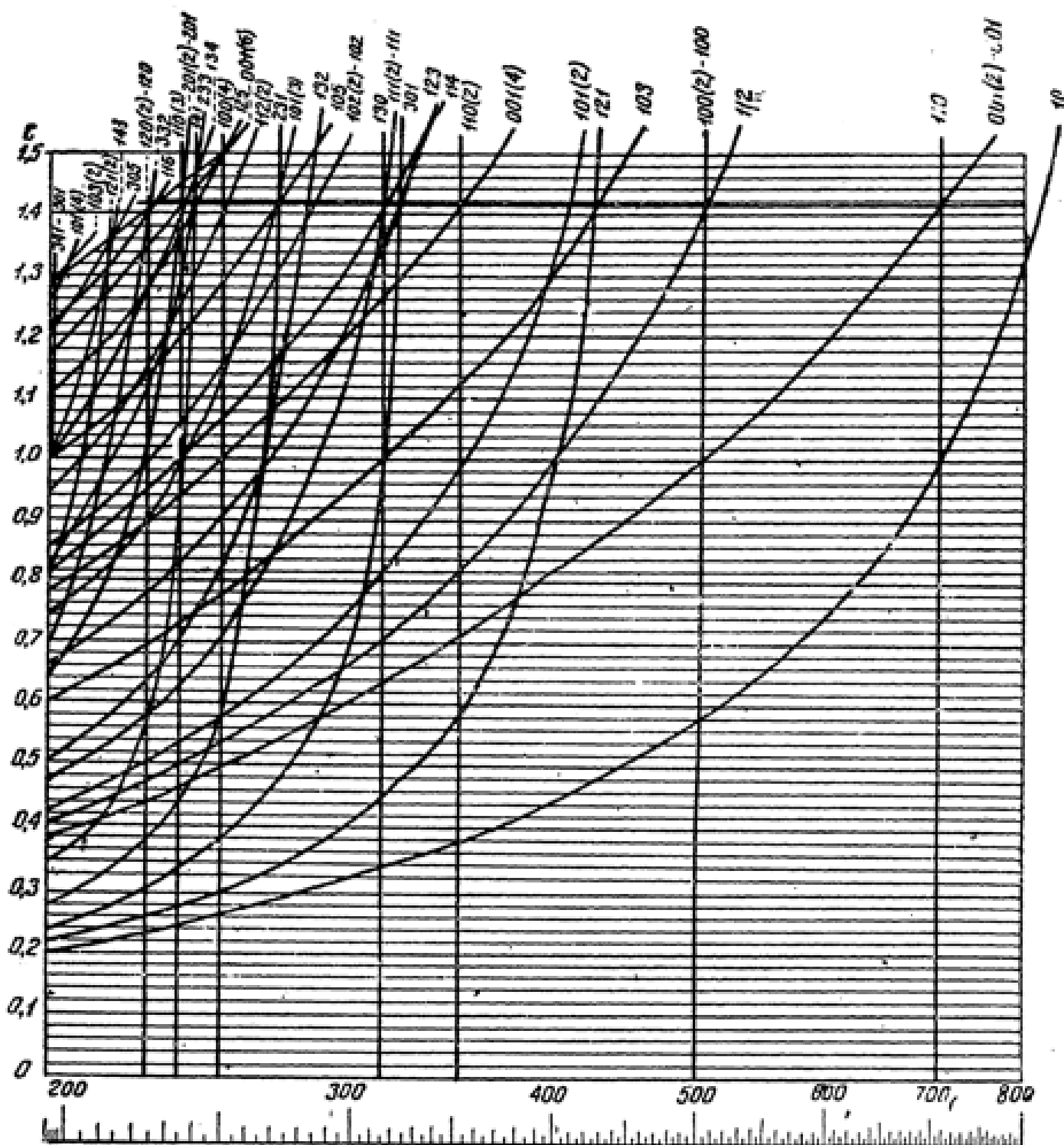


Рис. 66. Кривые Галла для пространственно-центрированной тетрагональной системы.

систем большое число колец на рентгенограмме и их частичное совмещение затрудняют надежную расшифровку.

Число атомов  $N$  в элементарной ячейке, объем которой  $v$ , может быть найден из соотношения:

$$\rho = \frac{N \cdot A \cdot m_k}{v},$$

где  $A$  — средний атомный вес вещества ячейки.

Расположение атомов в ячейке определяется по числу имеющихся на рентгенограмме колец и плотности их почернения. Если число пересечений найденной горизонтальной прямой превышает число имеющихся на пленке колец, то это указывает, что хотя решетка исследуемого вещества и принадлежит к данной системе (например кубической), но является не простой,

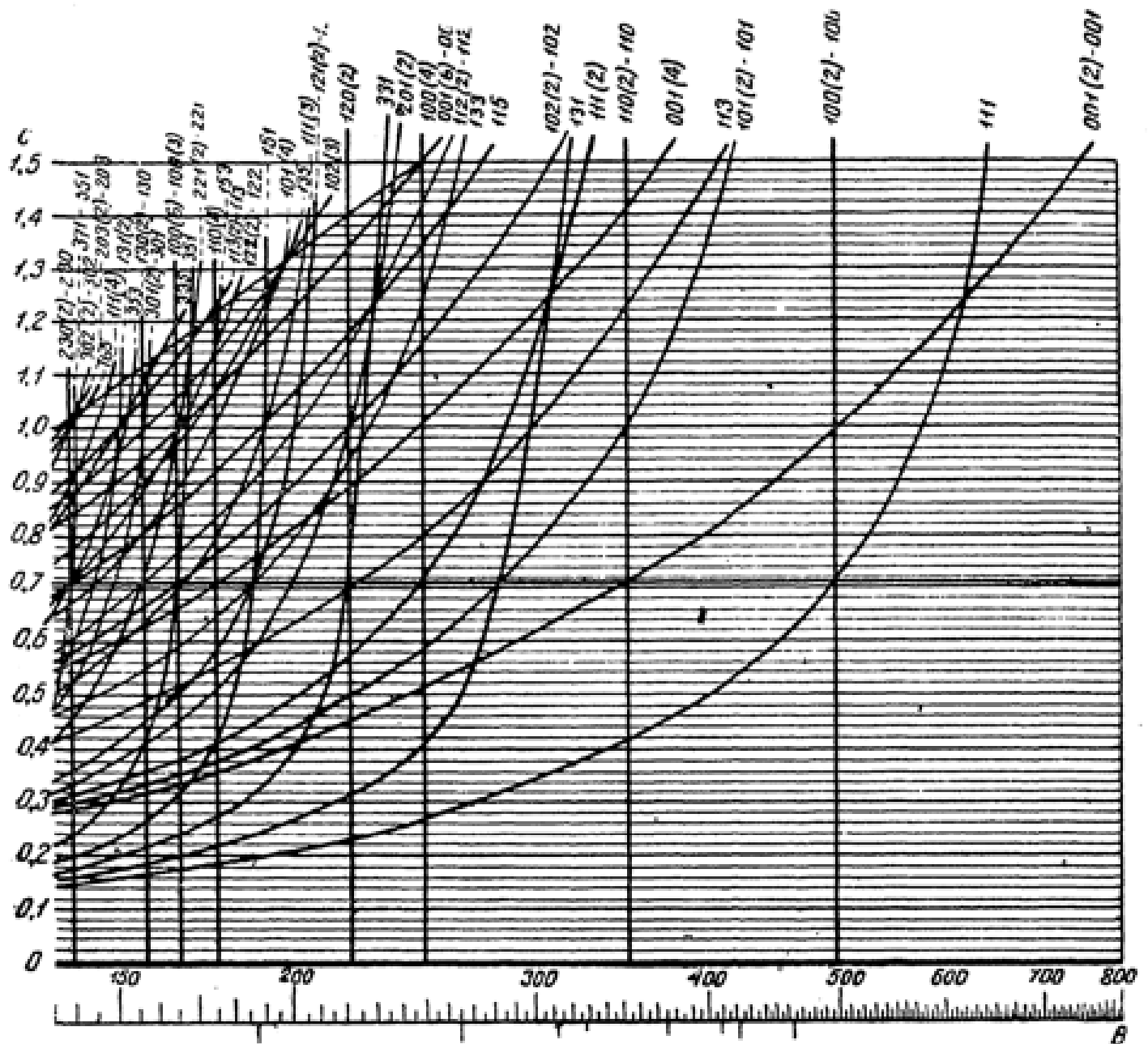


Рис. 67. Кривые Гэлла для гране-центрированной тетрагональной системы.

а сложной (например гране-центрированной). Исчезновение некоторых линий объясняется интерференцией лучей, рассеиваемых отдельными атомами ячейки, и учитывается так называемым структурным множителем  $\sum$ .

Если, например, ячейка содержит два одинаковых атома с координатами  $(m_0, n_0, p_0)$  и  $(m_1, n_1, p_1)$ , то интенсивность интерференционного пучка, отражаемого плоскостями с индексами  $(h, k, l)$ , пропорциональна  $\sum^2$ ,

где

$$\sum = e^{2\pi i \cdot (m_0 h + n_0 k + p_0 l)} + e^{2\pi i (m_1 h + n_1 k + p_1 l)}$$

Для пространственноцентрированной решетки любой системы координаты атомов будут: для вершины  $(0, 0, 0)$ , центра ячейки  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ , и значит

$$\sum = 1 + e^{\pi i(h+k+l)}$$

Отсюда следует, что при  $(h+k+l)$  четном  $\sum = 2$ ; в противном случае  $\sum = 0$ .

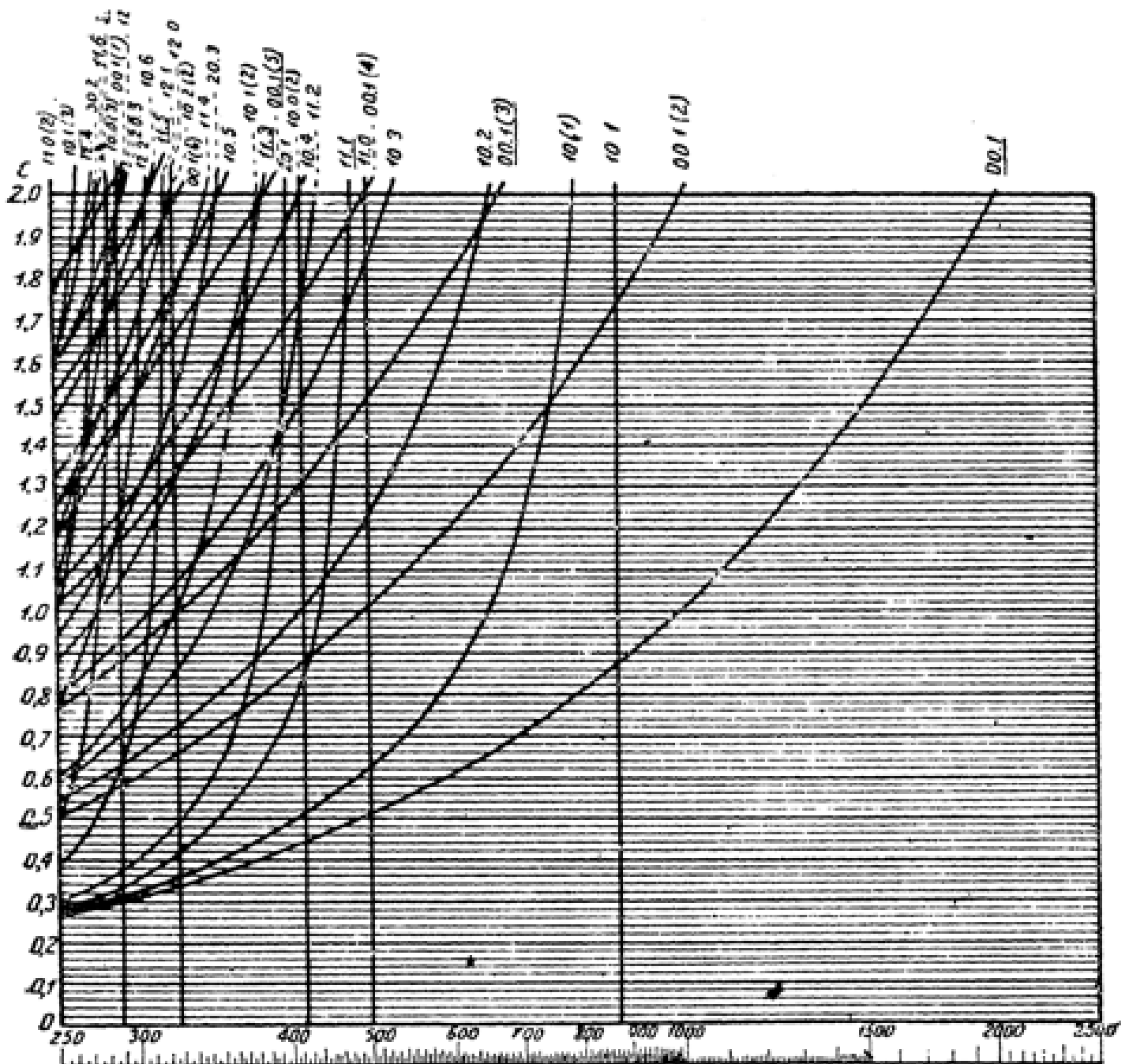


Рис. 68. Кривые Гэлла для гексагональной системы.

Для границентрированной решетки координаты атомов будут: для вершины  $(0, 0, 0)$ , для середины граней  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$   $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$   $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ , т. е.

$$\sum = 1 + e^{\pi i(k+l)} + e^{\pi i(l+h)} + e^{\pi i(h+k)}$$

Если все три индекса какой-либо плоскости четные или нечетные, то  $\Sigma = 4$ ;

если же индексы смешанные, то  $\Sigma = 0$ .

В случае различных атомов в ячейке отдельные члены структурного множителя следует умножить на атомный номер соответствующего атома, так что

$$\Sigma = Z_0 e^{2\pi i(m_0 h + n_0 k + p_0 l)} + Z_1 e^{2\pi i(m_1 h + n_1 k + p_1 l)}$$

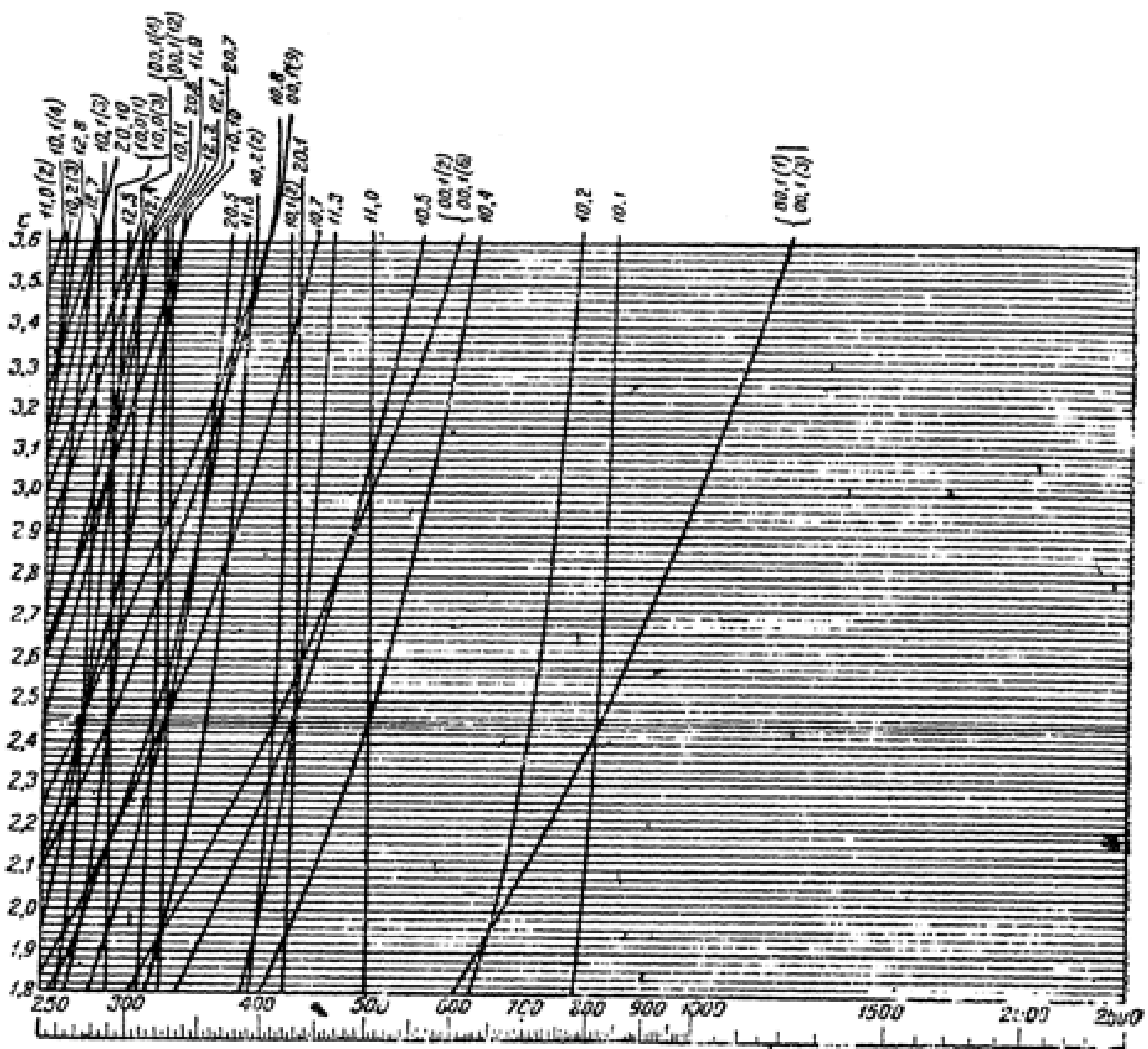


Рис. 69. Кривые Галла для ромбоэдрической системы.

Интенсивность отраженного пучка лучей зависит также от числа эквивалентных плоскостей кристалла, принадлежащих к данным индексам, или так называемого фактора повторяемости  $H^2$  и направления рассеяния, что приближенно учитывается множителем  $1 + \cos^2 2\theta$  (поляризационный множитель).

**Фактор повторяемости кристаллических плоскостей в случае Дебаевских рентгенограмм**

Число плоскостей ( $h, k, l$ ) относится ко всем плоскостям, индексы которых не выписаны особо

Кристаллическая система	Кристаллические классы по Ниггли	И н д е к с ы	Число эквивалентных плоскостей
Триклинная Моноклинная	$C_1, C_i$	(hkl)	2
	$C_2, C_2h$	(hkl) (hk0)	4 2
Ромбическая	$C_{2v}, V, V_h$	(00l)	2
		(hkl)	8
Гексагональная	$C_{3h}, C_6, C_{6h}$	(Ok1) (h0l) (hk0)	4
		(100) (010) (001)	2
		(hkl)	12
	$D_{3h}, C_{6v}, D_6, D_{6h}$	(hk0)	6
		(00l)	2
		(hkl)	24
Ромбоэдрическая (гексаг. коорд.)	$C_3, C_{3i}$	(hko) (hhl) (hhl)	12
		(110), (110)	6
	$C_{3v}, D_3, D_{3d}$	(001)	2
		(hkl)	6
		(001)	2
		(hkl)	12
		(110), (hhl)	6
Тетрагональная	$S_4, C_4, C_{4h}$	(001)	2
		(hkl)	8
		(hk0)	4
	$V_4, C_{4v}, D_4, D_{4h}$	(001)	2
		(hkl)	16
		(hko) (Ok1) (hhl)	8
Кубическая	$T, T_h$	(100), (110)	4
		(001)	2
		(hkl)	24
		(Ok1)	12
		(111)	8
	$T_d, O, O_h$	(100)	6
		(hkl)	48
		(Ok1) (hhl)	24
		(110)	12
		(111)	8
(100)	6		

Вводя поправки на неточность формулы Бреггов в связи с отражением лучей в некотором угловом интервале  $\Delta\theta \frac{1}{\sin^2 \theta \cdot \cos \theta}$  (множитель Лоренца)

и на тепловое колебательное движение атомов в кристалле  $e^{-\frac{aT}{\lambda^2} \sin^2 \theta}$  (Дебай), получим для плотности почернения пропорциональной энергии лучей, погло-

щенной активным слоем, выражение

$$S = c W_0' \gamma = k \cdot W_0 \cdot H \cdot e^{-\frac{\alpha T}{\lambda^2} \sin^2 \theta} \cdot \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \cdot \gamma \cdot \sum^2,$$

где  $W_0$  — энергия лучей, падающих на кристалл,

$W_0'$  — энергия лучей, падающих на пленку,

$\gamma$  — коэффициент электронного преобразования лучей в активном слое.

Отсюда

$$\frac{S}{\gamma} \cdot \frac{\sin^2 \theta \cdot \cos \theta}{H \cdot (1 + \cos^2 2\theta)} \cdot e^{\frac{\alpha T}{\lambda^2} \sin^2 \theta} = k \cdot W_0 \cdot \sum^2.$$

Так как  $k \cdot W_0$  для одной и той же рентгенограммы постоянно, то достаточно подобрать такое расположение атомов в кристалле, чтобы удовлетворялось приведенное выше соотношение.

Для полного решения вопроса о пространственной группе в общем случае материал, даваемый рентгенограммой по Дебаю, недостаточен, так как различные системы кристаллических плоскостей с одинаковым расстоянием  $d$  дают одно общее кольцо, между тем как они обладают различными структурными множителями (плотность почернения пленки зависит от нескольких структурных множителей).

В этих случаях оказывается необходимым снятие рентгенограмм Лауэ или вращения.

Если линейные размеры частиц мелкокристаллического агрегата заключаются в промежутке между  $10^{-3}$  —  $10^{-6}$  см, то на рентгенограмме кольца резко ограничены и равномерно зачернены. Для более мелких или более крупных кристаллов кольца расширяются, причем в первом случае ширина кольца  $a$ , измеренная между точками, в которых плотность почернения равна половине максимального значения, связана по Дебаю со средней длиной ребра отдельных кристалликов  $l$  кубической формы соотношением

$$\frac{a}{R} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{1}{\cos \theta} + b,$$

где  $b$  — постоянная, зависящая от размеров стержня кристаллического препарата. Ширина интерференционных пятен зависит также от угла расхождения конуса первичных лучей. Для параллельного пучка лучей и слабо поглощающего материала препарата постоянная

$$b = \frac{2\rho}{R}.$$

В общем случае  $b$  находится графически, как отрезок, отсекаемый на оси ординат прямой, выражающей линейную зависимость

$$\frac{a}{R} = f\left(\frac{1}{\cos \theta}\right).$$

Возрастание ширины интерференционных пятен, с увеличением размеров кристаллов, происходит до тех пор, пока сечение кристаллика в направлении, перпендикулярном отраженным лучам, остается меньше, чем сечение первичного пучка лучей.

В пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  см по исследованиям Басса существует линейное соотношение между шириной пятен и размерами зерен.

Каждое интерференционное пятно представляет собой изображение фокуса трубки, а потому измерение ширины пятен следует производить в одном и том же направлении.

Время экспозиции для снятия рентгенограмм зависит от применяемых величины и формы напряжения, силы анодного тока, фильтра, расстояния от фокуса трубки до кристалла, диаметра камеры, рода кристалла и сорта фотопленки. Чаще всего оно лежит в границах от 6 до 12 часов.

### б) Метод вращения кристаллов для монокристаллов

Принципиальная схема метода показана на рис. 70. Вид рентгенограммы дан на рис. 71. Лучи однородные (железо, медь, молибден). Направление освещения — перпендикулярно оси вращения.

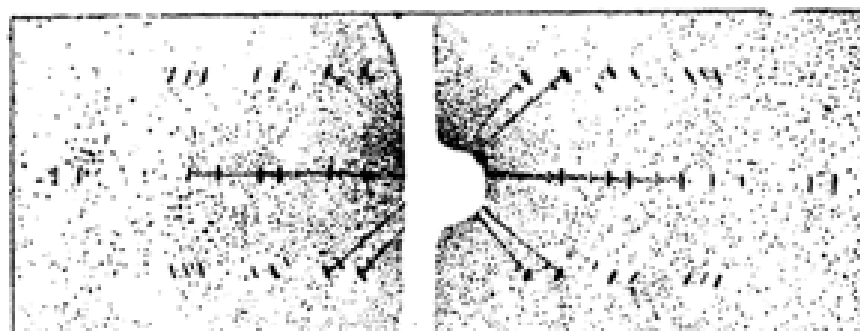
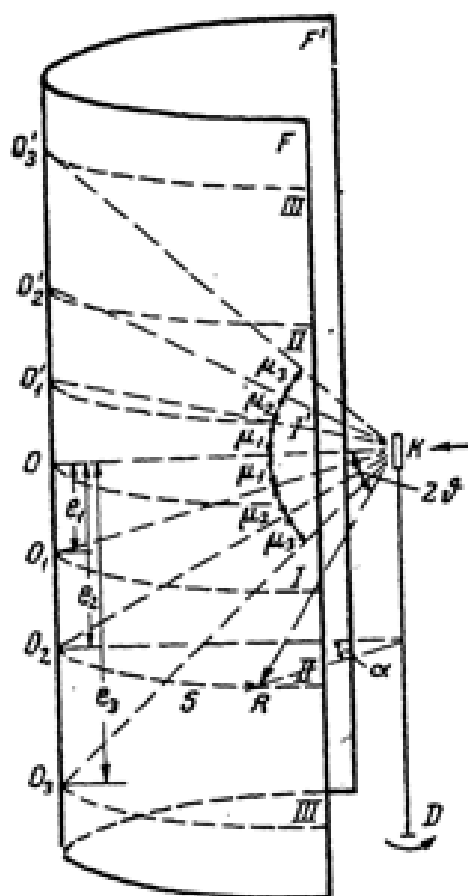


Рис. 70. Принципиальная схема метода вращения. Образование слоевых линий.

Рис. 71. Диаграмма вращения кристалла мочевины вокруг (001).

Положение пятен зависит от выбранной оси вращения кристалла, структуры решетки и длины волны лучей.

Плотность почернения зависит от интенсивности лучей, времени экспозиции и угла наклона отражающих плоскостей к оси вращения кристалла.

Отчетливые рентгенограммы получаются при вращении вокруг направлений с малыми индексами.

Кристалл не должен иметь каких-либо изъянов или внутренних напряжений.

### Расшифровка рентгенограммы.

По измеренным расстояниям  $e_n$  слоевых линий от нулевой линии (рис. 70) и радиусу цилиндра, образуемого пленкой  $R$ , находится слоевой угол  $\mu_n$ .

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{e_n}{R}.$$

По известным  $\mu_n$  и длине волны применяемого излучения  $\lambda$  находится расстояние эквивалентных узлов решетки в направлении оси вращения (период повторяемости):

$$L = \frac{n\lambda}{\sin \mu_n},$$

где  $n$  — порядковый номер слоевой линии.

При счете слоевых линий необходимо иметь в виду, что, с одной стороны, некоторые из них, вследствие тех или иных особенностей решетки и условий снимка могут отсутствовать (например, при слабой экспозиции), с другой — могут появиться лишние из-за нечистоты применяемого излучения.

Вычисляется угол отражения  $\theta$  из соотношения

$$\cos 2\theta = \cos \mu \cdot \cos \alpha,$$

где  $\operatorname{arcs} \alpha = \frac{S}{R}$ .

В случае применения фотографической пластинки, перпендикулярной направлению первичного пучка лучей на рентгенограмме, вместо прямых слоевых линий получается семейство гипербол и соответствующие формулы имеют вид.

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{r}{A},$$

$$L = \frac{n\lambda}{\sin 2\theta \cdot \cos \delta_0},$$

где  $A$  — расстояние от кристалла до пластинки и  $\delta_0$  угол под которым видно  $S$  из точки  $D$  (рис. 70).

Если  $L$  велико, т. е. направление, вокруг которого производится вращение, замещено атомами редко, то получаются слоевые линии, чрезвычайно близкие друг к другу, что затрудняет расшифровку.

В общем случае, когда ось вращения составляет с направлением первичного пучка лучей угол  $\beta$ , отличный от  $\frac{\pi}{2}$ , имеем для пленки

$$L = \frac{n\lambda}{\sin \mu_n + \cos \beta},$$

для пластинки, перпендикулярной к первичным лучам

$$L = \frac{n\lambda}{\sin 2\theta \cdot \cos \delta \cdot \sin \beta + 2 \cos \beta \sin^2 \gamma}.$$

Направление кристаллографических осей и принадлежность к одной из 6 кристаллических систем могут быть найдены путем снятия рентгенограмм по Лауэ.

Из квадратичной формы находятся значения  $\sin^2 \theta$  путем подстановки вместо индексов  $h$  и  $k$  ряда простых небольших чисел и полученные всевозможные значения сравниваются с  $\sin^2 \theta$ , найденным по рентгенограммам. Размеры элементарной ячейки находятся путем снятия рентгенограмм вращения вокруг трех кристаллографических осей, так как ребра ячейки равны расстоянию между двумя эквивалентными узлами  $L$  (периоду повторяемости).



Если этого сделать нельзя (например, игольчатый кристалл), то непосредственно определяется лишь одно ребро ячейки, а остальные находятся, при известной кристаллической системе, по найденным индексам отражающей плоскости.

Этот метод индцирования дает не вполне надежные результаты в том случае, если на пленке имеются лишь пятна, отвечающие плоскостям с высокими индексами, в виду недостаточной точности измерений.

Для определения трансляционной группы необходимо иметь дополнительные рентгенограммы вращения вокруг осей, число и направление которых зависит от кристаллической системы.

Определение числа атомов в элементарной ячейке производится из химической формулы, плотности и известных длин осей кристалла и углов между ними.

Выбор пространственной группы делается путем выделения групп, принадлежащих к данному кристаллическому классу и содержащих заданную трансляционную группу.

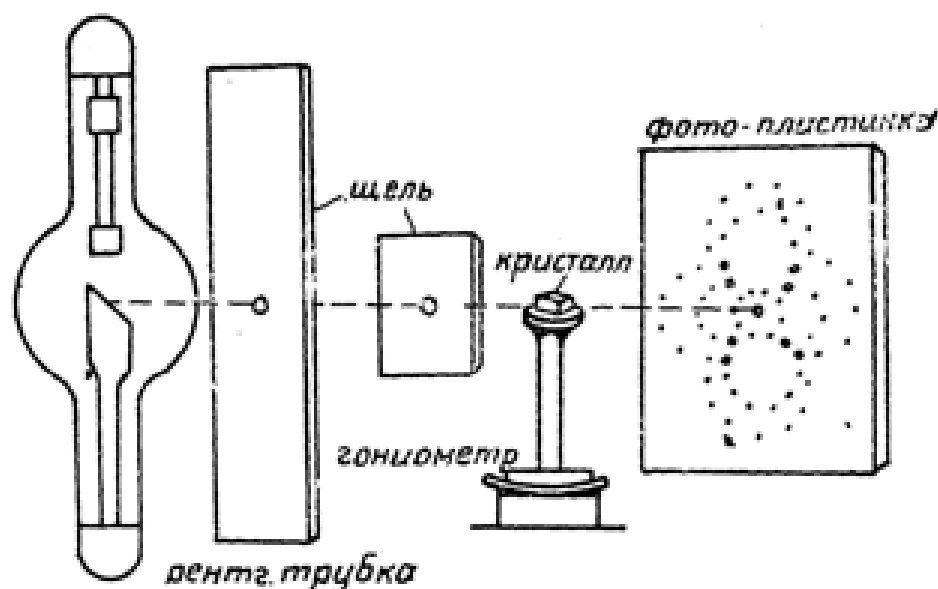


Рис. 72. Принципиальная схема метода Лауэ.

Расположение атомов в пространственной группе находится по кратности атомных положений и из выражений для плотности почернения путем вычисления структурного множителя

$$\frac{S}{\gamma} \cdot \frac{\sin^2 \theta \cdot \cos \theta}{H \cdot (1 + \cos^2 \theta)} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin \varphi}{\sin^2 \theta}} = k \cdot W_0 \sum_i^2$$

Здесь  $\sqrt{1 - \frac{\sin \varphi}{\sin^2 \theta}}$  — множитель, учитывающий различное время отражения разных систем плоскостей при равномерном вращении кристалла, в зависимости от наклона их к оси вращения.

### в) Метод Лауэ для монокристаллов (размером не менее 1,0 мм)

Принципиальная схема метода показана на рис. 72. Вид рентгенограммы дан на рис. 73. Лучи смешанные. Используется непрерывный спектр. Напряжение генерирования меньше потенциала возбуждения серии K анода. Трубка с острым фокусом.

Расположение пятен зависит от структуры кристалла и ориентировки его в пучке лучей. Освещение удобнее производить вдоль кристаллографической оси. Плотность почернения пятен зависит от времени экспозиции, интенсивности отраженных лучей и длины волны их.

Расшифровка рентгенограмм. Симметрия рентгенограммы отображает симметрию кристалла по отношению к направлению первичного пучка лучей.

Системы плоскостей, принадлежащие к одной и той же кристаллографической зоне (см. кристаллографические формулы), дают пятна на одном и том же эллипсе. (Рис. 73). Все пятна, обусловленные отражением лучей одной и той же длины волны, лежат на окружности с центром в пятне от первичного излучения.

По симметрии пятен (в этом случае направление лучей совпадает с кристаллографической осью) находят направление осей симметрии в кристалле, знание которых позволяет установить принадлежность кристалла к той или иной из шести кристаллических систем.

Длина волны отраженных лучей в методе Лауэ неизвестна, а потому анализ рентгенограмм позволяет на ряду с установленным индексом отражающих поверхностей, найти лишь отношение длины волны  $\lambda$  к постоянной решетки  $d$ . Из 32 различных симметрических классов кристаллографии с помощью рентгенограммы Лауэ можно различить одиннадцать групп. Все кристаллографические классы, отличающиеся друг от друга лишь центром симметрии, дают одинаковые рентгенограммы, так как плоскости  $(h, k, l)$  и  $(\bar{h}, \bar{k}, \bar{l})$  отражают одинаковым образом и дают одно общее пятно.

Таблица 69

Симметрия Лауэвской диаграммы по Викоффу  
Обозначение симметрических классов по Ниггли

Кристаллическая система	Кристаллич. класс	Симметрия Лауэвской диаграммы
Триклинная . . . . .	$C_1$ $C_1$	$C_1$
Моноклиная . . . . .	$C_S$ $C_2$ $C_{2h}$	$C_{2h}$
Ромбическая . . . . .	$C_{2v}$ $V$ $V_h$	$V_h$
Гексагональная . . . . .	$C_{3h}$ $C_6$ $C_{6h}$	$C_{6h}$
" . . . . .	$D_{3h}$ $C_{6v}$ $D_6$ $D_{6h}$	$D_{6h}$
" } Ромбоэдрический пол-отдел . . . . .	$C_3$ $C_{3i}$	$C_{3i}$
" } . . . . .	$C_{3v}$ $D_3$ $D_{3d}$	$D_{3d}$
Тетрагональная . . . . .	$S_4$ $C_4$ $C_{4h}$	$C_{4h}$
" . . . . .	$V_d$ $C_{4v}$ $D_4$ $D_{4h}$	$D_{4h}$
Кубическая . . . . .	$T$ $T_h$	$T_h$
" . . . . .	$T_d$ $O$ $O_h$	$O_h$

В сомнительных случаях полезно снятие рентгенограмм с различной ориентацией кристалла в пучке.

Определение индексов обычно производится графическим путем с помощью гномонической проекции, так как при этом на чертеже интерферен-

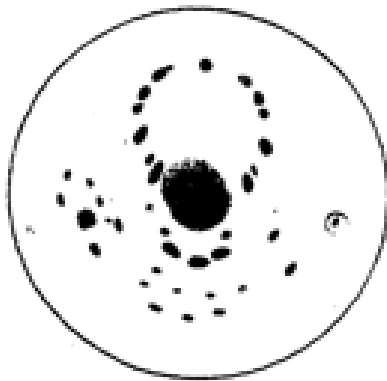


Рис. 73. Рентгенограмма  
Лауэ каменной соли.

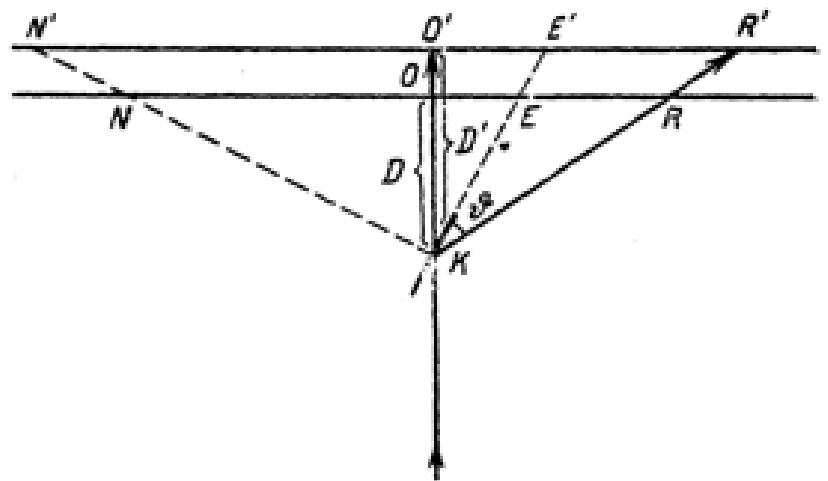


Рис. 74. Гномоническая проекция.

ционные точки, соответствующие кристаллическим плоскостям одной и той же зоны, лежат на прямой линии.

Если плоскость проекции перпендикулярна к одной из кристаллографических осей, то индексы плоских сеток могут быть непосредственно найдены из гномонической проекции.

Гномонической проекцией пятна  $R$  на фотопленке называется точка пересечения  $N$  нормали к отражающей плоскости с плоскостью фотопленки ( $ON = L$ ) (рис. 74).

При освещении кристалла вдоль кристаллографической оси плоскость гномонической проекции параллельна фотопленке.

Очевидно,

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{r}{D},$$

где  $r$  — расстояние интерференционного пятна на фотопленке от пятна в месте прохождения первичного пучка лучей сквозь фотопленку.

По измеренным  $r$  и  $D$  находится угол отражения  $\theta$ .

Так как  $O'N' = L = D \operatorname{ctg} \theta$ , то для выбранного значения  $D'$  (обычно полагают  $D' = 5 \text{ см}$ ) легко нанести все точки гномонической проекции, причем внешние точки проекции отвечают внутренним пятнам рентгенограммы.

По точкам гномонической проекции можно построить две или три системы равноотстоящих прямых линий, причем прямым, проходящим через

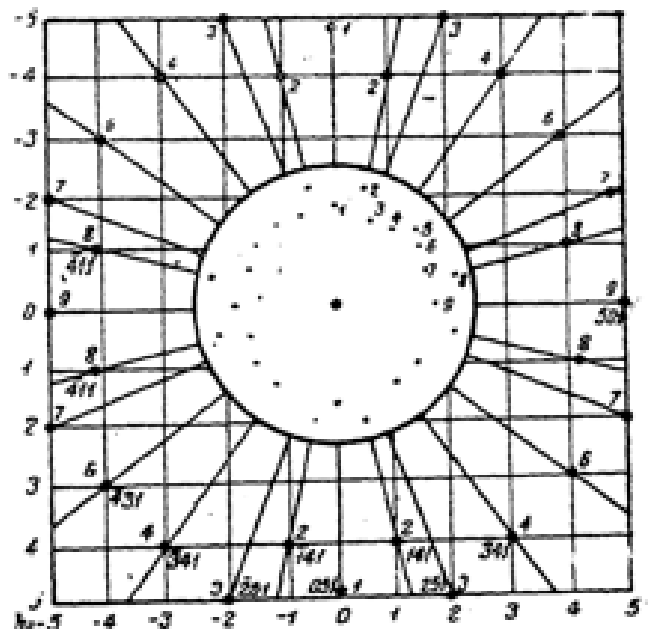


Рис. 75. Гномоническая проекция  
рентгенограммы  $\beta$  латуни.

центр проекции, отвечает  $h = 0$  и  $k = 0$ , в то время как третьему индексу  $l$  приписывается значение 1 (рис. 75).

В случае, когда линии гномонической сетки не проходят через центр проекции, как, например, на рис. 76, сторонам, наиболее близким к центру, приписываются индексы  $h = 0$ ,  $k = 0$  и  $l = 0$ .

Основные типы гномонических сеток диаграммы Лауэ приведены в табл. 70.

Таблица 70

Основные типы гномонической сетки Лауэских диаграмм

Расстояние плоскости проекций —  $D$  см. Длины кристаллографических осей  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ; ромбоэдрический угол  $\alpha$ .

Кристаллическая система	Направление первичных лучей <sup>1</sup>	Форма ячеек гномонической сетки	Длина сторон
Кубическая	Одна из 3 кристаллограф. осей (четверная ось)	Квадрат <sup>2</sup>	$D$
"	Пространственная диагональ куба (тройная ось)	Равносторонний треугольник	$\sqrt{6} \cdot D$
Тетрагональная	Главная ось ( $c$ )	Квадрат <sup>2</sup>	$D \cdot \frac{c}{a}$
"	Одна из двух других осей ( $a$ )	Прямоугольник <sup>2</sup>	$D$ и $D \cdot \frac{a}{c}$
Ромбическая	Ось $c$	"	$D \cdot \frac{c}{a}$ и $D \cdot \frac{c}{b}$
"	Ось $b$	"	$D \cdot \frac{b}{a}$ и $D \cdot \frac{b}{c}$
"	Ось $a$	"	$D \cdot \frac{a}{b}$ и $D \cdot \frac{a}{c}$
Гексагональная <sup>3</sup> (обычные гексагональные координаты)	Главная ось ( $c$ )	Ромб <sup>3</sup> (состоящий из двух равносторонних треугольников)	$\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot D \cdot \frac{c}{a}$
Ромбоэдрическая (ромбоэдрич. координаты)	Тройная ось	Равносторонний треугольник	$6D \sqrt{\frac{1}{4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} - \frac{1}{3}}$

<sup>1</sup> Во всех приведенных в таблице случаях кристаллографические индексы отражающих плоскостей могли быть непосредственно отсчитаны по проекции.

<sup>2</sup> Нулевые линии сетки проходят через центр первичного пятна.

<sup>3</sup> Включая и ромбоэдрический подотдел.

По известным индексам решетки ( $h, k, l$ ) и величине элементарной ячейки ( $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ ) определяется постоянная решетки  $d$ , а значит и  $n\lambda$  из соотношения Брэггов.

Так как для непрерывного спектра  $\lambda$  должна быть больше граничной длины волны  $\lambda_c$  и, кроме того, лежать в интервале спектра, обладающем наибольшей интенсивностью, то, задавая различные значения числу  $n$ , можно установить значение  $\lambda$ .

Для определения пространственной группы кристалла составляется перечень имеющихся и принципиально возможных, но отсутствующих отражений (индексное поле).

Установление координат атомов в элементарной ячейке связано с измерением плотности почернения пленок.

Сравнениям могут быть подвергнуты лишь почернения пятен, полученных отражением под одинаковыми углами  $\theta$  с учетом длин волн отраженных лучей (распределение плотности интенсивности по спектру и различное поглощение в активном слое фотопленки).

Аналогично ранее сказанному (стр. 178) приближенно

$$\frac{S}{\tau} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 2\theta} \cdot e^{\frac{\alpha T}{\lambda^2} \sin^2 \theta} = k W_0 \cdot \sum^2$$

Применимость указанной формулы ограничена теми системами отражающих плоскостей, для которых структурный множитель не играет существенной роли.

### г) Текстурдиаграммы

Если для рентгенограммы по Дебаю воспользоваться не цилиндрически изогнутой пленкой, а фотографической пластинкой, перпендикулярной к первичным лучам, то на ней образуются равномерно почерненные концентрические кольца, сплошные или расщепленные на отдельные мелкие точки в зависимости от размеров зерен препарата.

В противоположность беспорядочной ориентации кристалликов в кристаллическом порошке, кристаллы в проволоках и вальцованных пластинках до известной степени одинаково ориентированы, а потому при просвечивании перпендикулярно к оси проволоки или направлению вальцовки получаются не сплошные кольца, а лишь местные сильные почернения. При просвечивании вдоль оси проволоки получают равномерно зачерненные кольца не более одного двух.

Расположение, при котором у всех кристалликов определенное кристаллографическое направление оказывается параллельным, называется полной текстурой, а общее направление — осью текстуры.

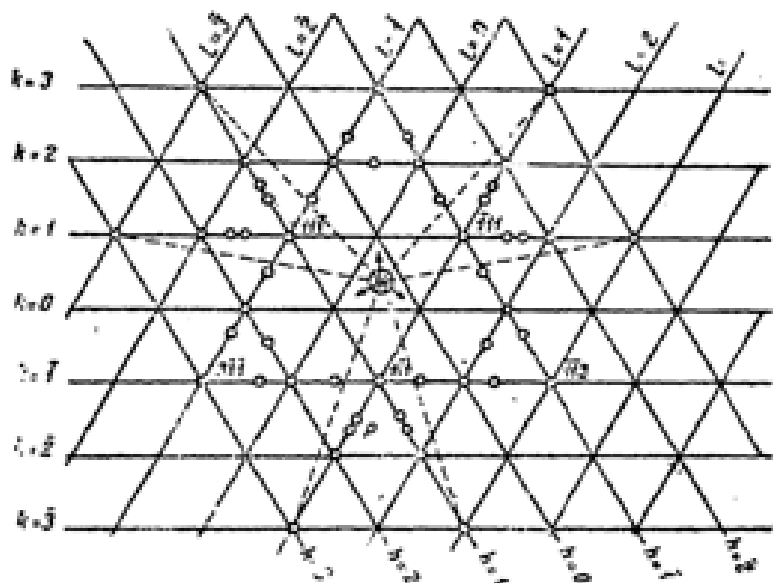


Рис. 76 Гномоническая проекция рентгенограммы цинковой обманки.

Для получения текстурдиаграммы тяжелых элементов вместо обычно применяемых в методе Дебая лучей меди выгоднее применять более проникающие лучи серебра или молибдена. Для слабо поглощающих волокнистых веществ целесообразнее пользоваться лучами меди.

Ориентированное положение кристалликов образуется при весьма разнообразных процессах кристаллизации. Структура роста при электролизе обладает той особенностью, что ось получаемой полной текстуры совпадает с направлением линии тока. Ось текстуры является направлением особенно быстрого роста кристаллов.

Структура деформации при волочении также всегда дает полную текстуру, причем кристаллические плоскости, наиболее плотно заполненные атомами, располагаются перпендикулярно оси проволоки.

Структура деформации при вальцовании дает ограниченную текстуру. Многообразие положений отдельных кристаллов здесь ограничено тем, что у всех кристаллов определенная кристаллографическая плоскость параллельна плоскости вальцовки, а одно кристаллографическое направление параллельно направлению вальцовки.

Положение кристаллитов зависит от типа решетки и степени деформирования.

В структуре для пространственно центрированных кубических решеток кристаллиты занимают лишь одно положение, для гране-центрированных имеются два зеркально симметричные положения.

Образование текстуры имеет место при одностороннем сжатии (алюминий) и растяжении (каучук). Особенно богатую область применения текстурдиаграммы имеют для исследований различных видов целлюлозы.

Структура рекристаллизации при отжиге дает исчезновение текстуры при вполне определенных температурах.

Нормальный отжиг при высокой температуре и соответственно удлиненный, но при более низкой температуре, не равноценны.

Признаком вполне „рекристаллизованного металла“ является не только прекращение роста зерен, но и их полная дезориентировка.

Расшифровка полных текстурдиаграмм. Все плоскости решетки с одинаковым расстоянием  $d$  дают пятна, лежащие на одном и том же кольце, независимо от их наклона к оси волокна.

После измерения радиусов колец  $r$  и расстояния от образца до пластинки  $A$  находится угол отражения  $\theta$ :

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{r}{A}.$$

По углу  $\theta$  и длине волны лучей  $\lambda$  из соотношения Бреггов находится расстояние  $d$  для каждого кольца.

Так как кристаллическая структура при получении текстурдиаграмм известна, то, подставляя в квадратичную форму решетки простые значения для индексов  $(h, k, l)$ , путем сравнения полученных, наблюдением и подсчетом значений  $\sin^2 \theta$  устанавливаются индексы соответствующих плоскостей.

Совокупность появляющихся на каком-либо конце точек сгущения позволяет найти углы  $(\rho)$  между определенным родом кристаллическими плоскостями с индексами  $(h, k, l)$  и осью волокна (ось вращения плоскости в текстуре) с индексами  $(u, v, w)$ .

Для кубической решетки

$$\cos \rho = \frac{u \cdot h + v \cdot v + l \cdot w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

В табл. 71 приведены углы наклона наиболее важных кристаллических плоскостей кубических решеток к оси волокон.

Так как согласно Поляни (рис. 77)

$$\cos \rho = \cos \delta_0 \cdot \cos \theta,$$

то при малых углах отражения  $\theta$  справедливо

$$\delta_0 \approx \rho.$$

Для непосредственного определения индексов оси текстуры могут быть применены снимки с различными углами наклона лучей к оси.

Если для получения отражения рентгеновские лучи должны пасть на кристаллическую плоскость, перпендикулярную оси текстуры, под углом  $\theta$ , то на снимке, для которого угол, образованный осью волокон с падающими лучами  $\beta = 90 - \theta$ , вверху на вертикальной линии в точке пересечения с одним из колец наблюдается интенсивное отражение. Последнее получается от плоскости, перпендикулярной к оси волокна, индексы которой могут быть определены по радиусу кольца.

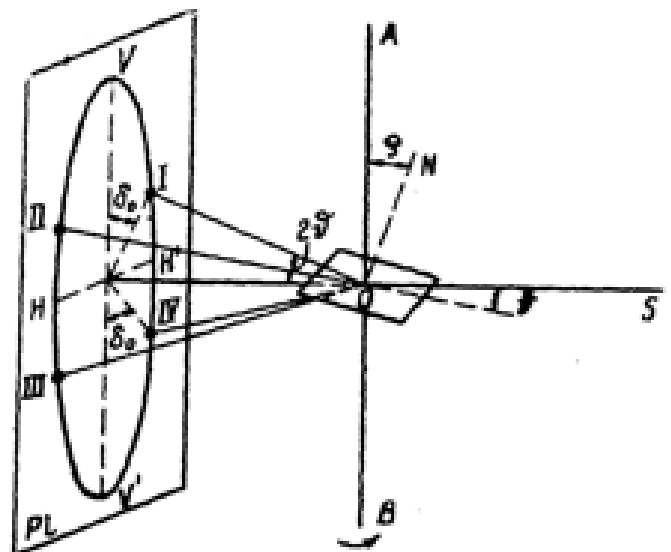


Рис. 77. Схема образования текстур-диаграммы.

В случае кубических решеток индексы оси волокон могут быть вычислены на основании одного снимка, если только на кольцо плоскости октаэдра и на кольцо плоскости куба встречается, по крайней мере, одна точка сгущения.

В случае произвольной октаэдрической точки (угол  $\delta_1$  на пластинке и соответственный ему  $\rho_1$ ) в качестве образующей плоскости рассматривается кристаллическая плоскость с индексами  $(1, 1, 1)$ .

Вследствие симметрии этой тройки индексов для последующих вычислений безразлично, приписать ли отражению от плоскости куба (углы  $\delta_2$  и  $\rho_2$ ) индексы  $(100)$  или  $(010)$  или  $(001)$ . Искомые индексы  $(u, v, w)$  оси волокна получаются из уравнений:

$$\cos \rho_1 = \frac{u+v+w}{\sqrt{3} \sqrt{u^2+v^2+w^2}}$$

$$\cos \rho_2 = \frac{u}{\sqrt{u^2+v^2+w^2}}$$

Расшифровка ограниченной текстуры. Индексы трех направлений, характеризующих структуру вальцовки (направление вальцовки, поперечное направление и нормаль к плоскости вальцовки), могут быть определены для кубических решеток на основании одного только снимка с пучком лучей, перпендикулярным направлению вальцовки графическим методом.

Угол наклона и фактор повторяемости  $N$  наиболее важных кристаллографических плоскостей в текстурдиаграммах кубических кристаллов

О. В. (001)			О. В. (110)			О. В. (111)			О. В. (112)			
Крист. плоск.	Градус	$N$	Крист. плоск.	Градус	$N$	Крист. плоск.	Градус	$N$	Крист. плоск.	Градус	$N$	
(100)	90	4	(100)	45	4	(100)	55	6	(001)	35	2	
(010)			(010)			(010)			(100)			
(101)	45	8	(001)	90	2	(001)	35	6	(010)	30	4	
(101)			(101)			(110)			(011)			
(011)			(011)			(011)			(110)			
(011)			(011)			(110)			(101)			
(110)	90	4	(110)	90	2	(101)	90	6	(011)	73	4	
(110)			(110)			(011)			(110)			
(111)	55	8	(111)	35	4	(111)	71	6	(111)	62	4	
(111)			(111)			(111)			(111)			
(111)			(111)			(111)			(111)			
(111)			(111)			(111)			(111)			
(112)	35	8	(211)	50	8	(112)	19	6	(121)	34	4	
(112)			(121)			(121)			(211)			
(112)			и т. д.			и т. д.			(112)			
(112)			(112)			(112)			(112)			
(112)			(112)			(112)			(112)			
(121)			(211)			(211)			(112)			
и т. д.			(211)			(211)			(112)			
(211)			и т. д.			и т. д.			(112)			
и т. д.			(112)			(112)			(121)			
и т. д.			(112)			(112)			(211)			
(011)	18	8	(130)	27	4	(013)	43	12	(013)	25	4	
(103)			(310)			(031)			(103)			
(013)	72	16	и т. д.	(301)	48	и т. д.	(013)	69	и т. д.	(013)	50	8
(103)			(031)	(031)		(103)						
и т. д.			(130)	и т. д.		(130)						
(301)			(310)	и т. д.		(310)						
и т. д.	72	16	и т. д.	(103)	77	и т. д.	(013)	75	и т. д.	(130)	75	4
(301)			(013)	и т. д.		(310)						
и т. д.			(130)	и т. д.		(310)						
и т. д.			(013)	и т. д.		(310)						
(113)	25	8	(311)	31	4	(113)	30	6	(301)	81	4	
(113)			(131)			(131)			(113)			
(113)	72	16	и т. д.	(113)	65	и т. д.	(113)	59	и т. д.	(113)	61	6
(113)			(113)	(113)		(113)						
(131)			и т. д.	и т. д.		(113)						
и т. д.			(113)	и т. д.		(113)						
(311)	72	16	и т. д.	(113)	90	и т. д.	(113)	80	и т. д.	(131)	76	4
и т. д.			и т. д.	и т. д.		(131)						
и т. д.	72	16	и т. д.	(131)	90	и т. д.	(131)	80	и т. д.	(311)	76	4
и т. д.			и т. д.	и т. д.		(311)						
и т. д.	72	16	и т. д.	(131)	90	и т. д.	(131)	80	и т. д.	(111)	90	4
и т. д.			и т. д.	и т. д.		(131)						



На основании данных табл. 71 находится ось текстуры.

Строятся углы отражения лучей, падающих перпендикулярно к оси вращения, на различные кристаллические плоскости, как функции угла вращения одного кристалла  $\psi$  от 0 до  $360^\circ$

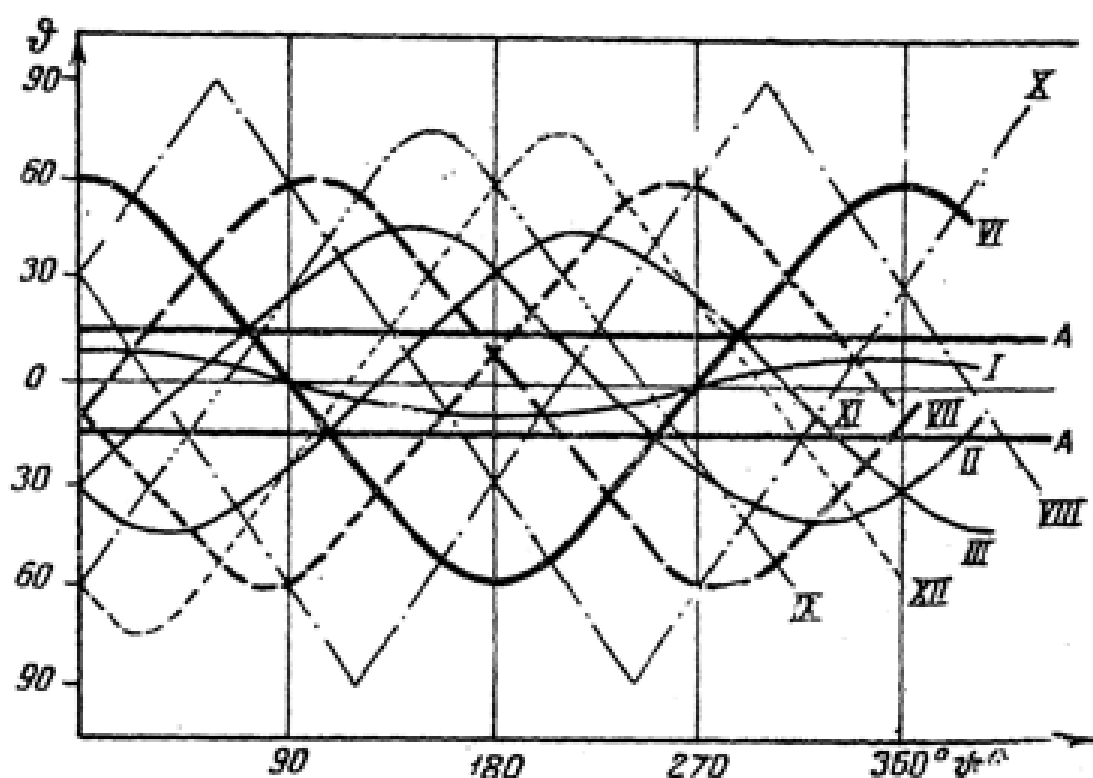


Рис. 78. Кривые вращения для оси вращения (112) плоскости куба.

Исходным направлением ( $\psi = 0$ ) избирается кристаллографическое направление с простыми индексами (например 111).

На расстоянии  $\pm \theta$  проводятся две прямые параллельные оси абсцисс ( $\theta$  вычисляется из условия Бреггов по известным  $\lambda$  и  $d$ ) и тем самым находятся возможные значения угла  $\psi$ , а по ним индексы кристаллических плоскостей, дающих точки сгущения на кольцах.

Другой способ определения положения кристаллов в структуре вальцовки заключается в нахождении полюсной фигуры на основании ряда снимков.

Определение положения отражающей кристаллической плоскости производится с помощью стереографической проекции, причем точки пересечения нормалей к плоскостям со сферой стереографически проектируются на плоскость, проходящую через нормаль к пластинке и поперечное направление ее.

Направление вальцовки при этом перпендикулярно к плоскости чертежа.

Очевидно, при беспорядочной ориентировке кристаллов весь круг полюсной фигуры (рис. 79) был бы заштрихован.

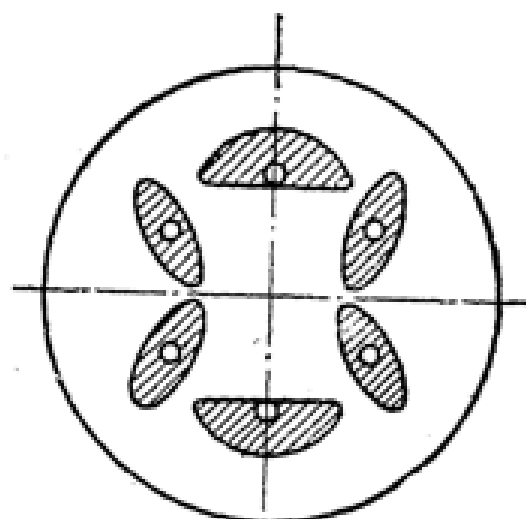


Рис. 79. Полюсная фигура по Веверу. Расположение плоскостей куба в фольгах вальцованного алюминия.

## § 5. Кристаллографические формулы

### 1. Кристаллографические системы осей и соответствующие элементы решетки

Отрезки осей $abc$	Углы между гранями $\alpha, \beta, \gamma$	$\alpha = \angle (b, c)$ и т. д.
Триклинная система . . .	$a, b, c$ любые	$\alpha, \beta, \gamma$ любые
Моноклинная система . .	$a, b, c$ "	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta$ любой
Ромбическая система . . .	$a, b, c$ "	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Гексагональная система .	$a = b, a$ и $c$ "	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Ромбоэдрическая система (подразделение гекс. сист.)	$a = b = c, a$ "	$\alpha = \beta = \gamma, \alpha$ любое
Тетрагональная система .	$a = b, a$ и $c$ "	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая система . . .	$a = b = c, a$ "	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

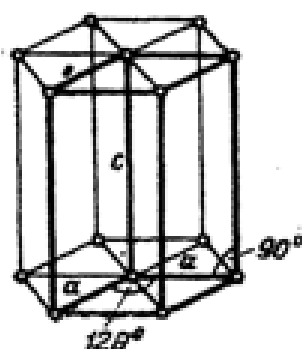


Рис. 80. Гексагональная ячейка.

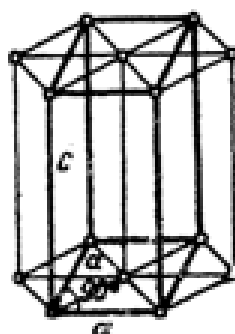


Рис. 81. Ортогексагональная ячейка.

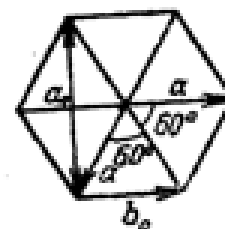


Рис. 82. Связь между гексагональной и ортогексагональной ячейками.

В некоторых случаях выгодно описать гексагональную кристаллическую структуру в прямоугольной, так называемой „ортогексагональной“ системе осей. Связь между гексагональными осями  $a, c, \gamma = 120^\circ$  и ортогексагональными осями  $a_0, b_0, c_0, \alpha_0 = \beta_0 = \gamma_0 = 90^\circ$  можно проследить по формам ячеек (рис. 80, 81, 82), так что мы имеем:

$$a_0 = a\sqrt{3}, \quad b_0 = a, \quad c_0 = c.$$

### 2. Связь между гексагональной и ромбоэдрической решетками

Гексагональная решетка, элементарная ячейка которой содержит, кроме узлового атома, еще два атома, расположенных согласно рис. 83 [координаты  $(1/3, 2/3, 1/3)$  и  $(2/3, 1/3, 2/3)$ ], может быть еще проще описана при помощи элементарной ячейки (содержащей лишь один атом) ромбоэдрического вида. Основная плоскость четырех гексагональных ячеек, вместе с проекциями лежащих на расстоянии  $1/3$  или  $2/3$  над нею атомов, изображена на рис. 84. На рис. 85 представлено положение ромбоэдрической ячейки. Из восьми угловых точек шести лежат на высоте  $1/3$  или  $2/3$  ребер гексагональной призмы основная плоскость которой изображена пунктирными линиями на рис. 84. Три исходящие от центра пунктирные линии на рис. 84 представляют собой проекцию трех ребер ромбоэдра (длина  $a_{Rh}$ ), образующих между собою

равные углы  $\alpha$ . Из длин ребер гексагональной призмы ( $a$  и  $c$ ) можно вычислить  $a_{Rh}$  и  $\alpha$  согласно следующему уравнению:

$$a_{Rh} = \sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{9}} = a \sqrt{\frac{1}{3} + \left(\frac{c}{a}\right)^2 \cdot \frac{1}{9}}.$$

$$3 \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3} + \left(\frac{c}{a}\right)^2 \cdot \frac{1}{9}}}.$$

Объем  $V$  элементарных ячеек различных систем пространственных решеток (параллелепипед с ребрами  $a, b, c$  и углами  $\alpha, \beta, \gamma$ ) может быть вычислен следующим образом:

Триклинная система,

$$V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}.$$

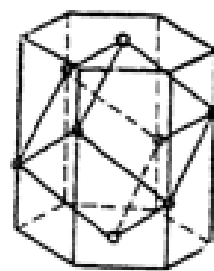
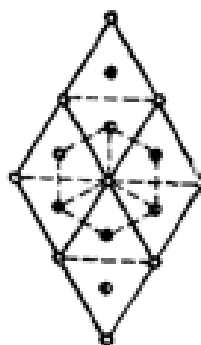
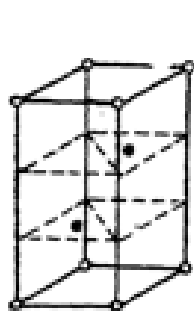


Рис. 83. Гексагональная решетка, расположение атомов которой удовлетворяет ромбоэдрическому условию.

Рис. 84. Связь между гексагональной и ромбоэдрической решетками.

Рис. 85. Ромбоэдрическая решетка.

Моноклинная  $V = abc \sin \beta$ .

Ромбическая система,  $V = abc$ .

Гексагональная система,  $V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c$ .

Ромбоэдрическая система (ромбоэдрическое подразделение гексагональной системы):

$$V = a^3 \sqrt{1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha}.$$

Тетрагональная система,

$$V = a^2 c.$$

Кубическая система,

$$V = a^3.$$

Ортогексальная элементарная ячейка (рис. 81) в два раза больше гексагональной (рис. 83), а ромбоэдрическая — в три раза меньше последней.

### 3. Преобразование осей и индексов

Индексы  $(h, k, l)$  граней при переходе к другой системе осей превращаются в  $(h', k', l')$ ; если в старой системе координаты концов новых основных векторов равны

$$u_1, v_1, w_1, \quad u_2, v_2, w_2, \quad u_3, v_3, w_3,$$

то мы имеем:

$$h' = u_1 h + v_1 k + w_1 l,$$

$$k' = u_2 h + v_2 k + w_2 l,$$

$$l' = u_3 h + v_3 k + w_3 l.$$

Вычисленные таким образом индексы ( $h'$ ,  $k'$ ,  $l'$ ) могут еще иметь общий делитель.

Преобразование гексагональных индексов ( $h$ ,  $k$ ,  $l$ ) в ортогексагональные  $h'$ ,  $k'$ ,  $l'$ .

$$h' = k + 2h \quad \text{и обратно} \quad h = \frac{h' - k'}{2}$$

$$k' = k \quad \text{" " " " } \quad k = k'.$$

$$l' = l \quad \text{" " " " } \quad l = l'.$$

Преобразование гексагональных индексов ( $h$ ,  $k$ ,  $l$ ) в ромбоэдрические ( $p$ ,  $q$ ,  $r$ )

$$p = 2h + k + l \quad \text{и обратно} \quad h = p - q$$

$$q = k - h + l \quad \quad \quad k = q - r$$

$$r = -2k - h + l \quad \quad \quad l = p + q + r.$$

если отвлекаться от наличия возможного общего делителя.

Преобразование ортогексагональных индексов ( $h'$ ,  $k'$ ,  $l'$ ) в ромбоэдрические ( $p$ ,  $q$ ,  $r$ )

$$p = 2h' + 2l' \quad \text{и обратно} \quad h' = 2p - q - r$$

$$q = -h' + 3k' + 2l' \quad \quad \quad k' = q - r$$

$$r = -h' - 3k' + 2l' \quad \quad \quad l' = p + q + r.$$

если отвлекаться от наличия возможного общего делителя.

#### 4. Расстояние между плоскостями и квадратичная форма

Расстояние  $d$  для плоскостей с индексами ( $h$ ,  $k$ ,  $l$ ) может быть вычислено следующим образом из осей и углов между осями, причем

$$s_{11} = b^2 c^2 \sin^2 \alpha \quad s_{12} = abc^2 (\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)$$

$$s_{22} = a^2 c^2 \sin^2 \beta \quad s_{23} = a^2 hc (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha)$$

$$s_{33} = a^2 b^2 \sin^2 \gamma \quad s_{13} = ab^2 c (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$$

и

$$V^2 = a^2 b^2 c^2 (1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma)$$

Триклинная система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} \{s_{11} h^2 + s_{22} k^2 + s_{33} l^2 + 2s_{12} hk + 2s_{23} kl + 2s_{13} hl\}.$$

Моноклинная система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2 \sin^2 \beta} - \frac{2hl \cos \beta}{ac \sin^2 \beta}.$$

Ромбическая система

$$\frac{1}{d^2} = \left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2.$$

Гексагональная система <sup>1</sup>

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}.$$

Ортогексагональная система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{3} \left( \frac{h}{a} \right)^2 + \left( \frac{k}{a} \right)^2 + \left( \frac{l}{c} \right)^2.$$

Ромбоэдрическая система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}{a^2(1 - 3\cos^2 \alpha + 2\cos^3 \alpha)}.$$

Тетрагональная система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}.$$

Кубическая система

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}.$$

Если же в эти уравнения вставить по порядку простейшие целые числа для  $h, k, l$ , то можно получить все возможные плоские решетки.

Из брегговского закона отражения:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

следует, что угол отражения  $\theta$  всех граней  $(h, k, l)$  любой решетки должен подчиняться уравнению следующего вида:

Квадратичная форма триклинной решетки

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} \cdot \frac{1}{V^2} \{s_{11}h^2 + s_{22}k^2 + s_{33}l^2 + 2s_{12}hk + 2s_{23}kl + 2s_{13}hl\}.$$

Частные случаи:

Гексагональная система:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} \left\{ \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right\}.$$

Ромбическая система:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} \left\{ \left( \frac{h}{a} \right)^2 + \left( \frac{k}{b} \right)^2 + \left( \frac{l}{c} \right)^2 \right\}.$$

Отсюда тетрагональная система для  $a = b$ .

„ кубическая „ „ „  $a = b = c$ .

## 5. Угол между двумя гранями кристалла

$\angle \varphi$  есть угол, который образуют нормали к обеим граням  $(h, k, l)$  и  $(h', k', l')$ ;  $d$  и  $d'$  — расстояние между параллельными гранями,  $V$  — объем элементарной ячейки решетки. Значение  $s_{11}$ ,  $s_{22}$  и т. д., как и в предыдущем разделе.

<sup>1</sup> В случае обычного гексагонального обозначения тремя индексами  $(h, k, l)$  не всегда можно сразу узнать, каким плоскостям решетки соответствует одинаковое  $d$ , например  $(102)$  и  $(112)$  и  $(102)$ . Если, однако, нужно писать 4 индекса  $(h, k, l, l')$ , то, вследствие симметрии гексагональной системы путем перестановки индексов  $h, k, l$  могут быть получены все однозначные плоскости трех побочных осей; так, например, значкам  $(1012)$  соответствуют эквивалентные плоскости  $(1102)$  и  $(1012)$ : если опустить 3-й индекс, то получаются однозначные плоскости с равными  $d$   $(102)$  и  $(102)$  и  $(102)$ .

Триклинная система:

$$\cos \varphi = \frac{d \cdot d'}{V^2} \{s_{11}h_1h_2 + s_{22}k_1k_2 + s_{33}l_1l_2 + s_{23}(k_1l_2 + k_2l_1) + \\ + s_{13}(l_1h_2 + l_2h_1) + s_{12}(h_1k_2 + k_2h_1)\}.$$

Частные случаи:

Гексагональная система:

$$\cos \varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + \frac{1}{2}(h_1k_2 + h_2k_1) + \frac{3a^2}{4c^2} \cdot l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + h_1k_1 + \frac{3a^2}{4c^2} \cdot l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + h_2k_2 + \frac{3a^2}{4c^2} \cdot l_2^2)}}.$$

Ромбическая система:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{h_1h_2}{a^2} + \frac{k_1k_2}{b^2} + \frac{l_1l_2}{c^2}}{\sqrt{\left[\left(\frac{h_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{k_1}{b}\right)^2 + \left(\frac{l_1}{c}\right)^2\right] \left[\left(\frac{h_2}{a}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{b}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{c}\right)^2\right]}}.$$

Отсюда тетрагональная система для  $a = b$ .

„ кубическая „ „ „  $a = b = c$ .

## 6. Угол между двумя прямыми и в частности между ребрами кристалла

Угол  $\psi$ , который образует между собой две прямые<sup>1</sup> с индексами  $(u_1, v_1, w_1)$  и  $(u_2, v_2, w_2)$ , может быть вычислен из

$$\cos \psi = f(u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2, a, b, c, \alpha, \beta, \gamma).$$

Общая форма функций  $f$  найдется: Ниггли (Niggli), Учебник минералогии.

Частные случаи:

Гексагональная система:

$$\cos \psi = \frac{u_1u_2 + v_1v_2 - \frac{1}{2}(u_1v_2 + u_2v_1) + w_1w_2 \left(\frac{c}{a}\right)^2}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2 - u_1v_1 + w_1^2 \left(\frac{c}{a}\right)^2} \sqrt{u_2^2 + v_2^2 - u_2v_2 + w_2^2 \left(\frac{c}{a}\right)^2}}$$

Ромбическая система:

$$\cos \psi = \frac{u_1u_2a^2 + v_1v_2b^2 + w_1w_2c^2}{\sqrt{u_1^2a^2 + v_1^2b^2 + w_1^2c^2} \sqrt{u_2^2a^2 + v_2^2b^2 + w_2^2c^2}}.$$

Отсюда тетрагональная система для  $a = b$ .

„ кубическая „ „ „  $a = b = c$ .

## 7. Расстояние между соседними точками по выбранному направлению трансляционных решеток

Расстояние  $J_e$  между соседними точками на прямой  $(u, v, w)$  в случае „простых трансляционных решеток“:

$$J_e^2 = u^2a^2 + v^2b^2 + w^2c^2 + 2uvab \cos \gamma + 2vwhc \cos \alpha + 2uwca \cos \beta$$

триклинная решетка.

<sup>1</sup> Направление прямой с индексами  $(u, v, w)$  обыкновенно отличается от направления нормали к граням с равными индексами  $(u, v, w)$ ; только в кубической системе оба направления совпадают.

О П Е Ч А Т К И

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
197	12 <sup>а</sup> сверху	(110)	( $\bar{1}\bar{1}0$ )
197	14 "	(110), (101), (011)	( $\bar{1}\bar{1}0$ ) ( $\bar{1}0\bar{1}$ ) ( $\bar{0}11$ )
197	15—16 сверху	(111), (111), (111)	(111) ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ) ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )
197	сноска	(111) переменить у	( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ) переменить знак у

Справочн. по рентгеном.

Частные случаи:

Гексагональная система:

$$J_e = a \sqrt{u^2 + v^2 - uv + w^2 \left(\frac{c}{a}\right)^2}.$$

Ромбическая система:

$$J_e = \sqrt{u^2 a^2 + v^2 b^2 + w^2 c^2}.$$

Отсюда тетрагональная система для  $a = b$ .

„ кубическая „ „  $a = b = c$ .

В случае сложных трансляционных решеток с центрированными основаниями, центрированными гранями и центрированными ячейками трансляционных групп получаем следующие отклонения:

$$\begin{array}{l} \text{в случае центрирования} \\ \text{основания граней } \Gamma'_{m'}, \Gamma'_{v'} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{в случае центрирования} \\ \text{основания граней } \Gamma'_{m'}, \Gamma'_{v'} \end{array}} \right\} J_{bz} = \frac{1}{2} J_e \quad \text{для прямых } \left. \begin{array}{l} (110), (110) \\ (110), (101), (011) \\ (110), (101), (011) \end{array} \right\} \\ \text{центрированных граней} \\ \Gamma''_{v'}, \Gamma'_{c'} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{центрированных граней} \\ \Gamma''_{v'}, \Gamma'_{c'} \end{array}} \right\} J_{fz} = \frac{1}{2} J_e \quad \text{для прямых } \left. \begin{array}{l} (110), (101), (011) \\ (110), (101), (011) \end{array} \right\} \\ \text{центрированных ячеек} \\ \Gamma'''_{v'}, \Gamma'_{q'}, \Gamma''_{c'} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{центрированных ячеек} \\ \Gamma'''_{v'}, \Gamma'_{q'}, \Gamma''_{c'} \end{array}} \right\} I_{rz} = \frac{1}{2} I_e \quad \text{для прямой } \left. \begin{array}{l} (111), (111), (111), \\ (111) \end{array} \right\}$$

## 8. Закон зон

Под „зоной“ подразумеваются все плоскости кристалла, параллельные одной прямой; эта прямая называется „осью зоны“.

Плоскость  $(h, k, l)$  принадлежит к зоне  $(u, v, w)$ , т. е. нормаль к плоскости перпендикулярна оси зоны  $(u, v, w)$ , если:

$$uh + vk + wl = 0.$$

Для определения индексов  $(h, k, l)$  плоскости, о которой известно, что она принадлежит обеим зонам  $(u_1, v_1, w_1)$  и  $(u_2, v_2, w_2)$ , индексы оси зоны пишутся следующим образом: первые и последние члены отделяются, а средняя часть вычисляется из формулы теории определителей:

$$\begin{array}{c} u_1 \left| \begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \end{array} \right. \times \begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array} \times \begin{array}{c} u_1 \\ u_2 \end{array} \times \begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \end{array} \left| \begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array} \right. \\ u_2 \left| \begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \end{array} \right. \times \begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array} \times \begin{array}{c} u_1 \\ u_2 \end{array} \times \begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \end{array} \left| \begin{array}{c} w_1 \\ w_2 \end{array} \right. \end{array}$$

Имеем, следовательно:

$$h : k : l = (v_1 w_2 - v_2 w_1) : (w_1 u_2 - w_2 u_1) : (u_1 v_2 - u_2 v_1).$$

Индексы  $(u, v, w)$  прямой, которая лежит одновременно в плоскости  $(h_1, k_1, l_1)$  и в плоскости  $(h_2, k_2, l_2)$ , т. е. индексы оси зон могут быть вычислены аналогичным образом:

$$\begin{array}{c} h_1 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. \times \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} \times \begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \end{array} \times \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \left| \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} \right. \\ h_2 \left| \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \right. \times \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} \times \begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \end{array} \times \begin{array}{c} k_1 \\ k_2 \end{array} \left| \begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \end{array} \right. \end{array}$$

а именно:

$$u : v : w = (k_1 l_2 - k_2 l_1) : (l_1 h_2 - l_2 h_1) : (h_1 k_2 - h_2 k_1).$$

Закон зон употребляется при расчете рентгенограммы Лауэ.

<sup>1</sup> И для прямых, которые получаются из написанных, если переменить у написанных индексов.



## 9. Структурный множитель

Если координаты атомов в элементарной ячейке выражены в дробных долях длины ребер  $(m_1, n_1, p_1)$   $(m_2, n_2, p_2)$  и т. д. и атомные номера различных встречающихся в решетке видов атомов  $A, B$  и т. л., то тогда структурный множитель равен

$$\Sigma = A e^{2\pi i(m_1 h + n_1 k + p_1 l)} + B e^{2\pi i(m_2 h + n_2 k + p_2 l)} + \dots,$$

где  $(h, k, l)$  обозначают индексы отражающих граней.

Решетка пространственно-центрированного куба

2 одинаковых атома:  $(000)$  и  $\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right)$

$$\Sigma = 2 e^{\pi i(h+k+l)}$$

$$\Sigma = 0 \text{ для } h + k + l = 2n + 1$$

$$\Sigma = 2 \text{ для } h + k + l = 2n$$

$$\left. \begin{array}{l} \Sigma = 0 \text{ для } h + k + l = 2n + 1 \\ \Sigma = 2 \text{ для } h + k + l = 2n \end{array} \right\} n = 0, 1, 2, 3, 4 \dots$$

Кубическая решетка с центрированными гранями

4 одинаковых атома:  $(000)$ ,  $\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right)$ ,  $\left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right)$ ,  $\left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right)$

$$\Sigma = 1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(k+l)} + e^{\pi i(h+l)}$$

$\Sigma = 0$ , если  $h, k, l$  числа „смешанные“ по четности

$\Sigma = 4$ , если  $h, k, l$  числа четные или все нечетные.

Тип хлористого цезия

Два разных атома:  $A(000)$ ,  $B\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right)$ .

$$\Sigma = A + B e^{\pi i(h+k+l)}$$

$$\Sigma = A + B, \text{ если } h + k + l = 2n$$

$$\Sigma = A - B, \text{ „ } h + k + l = 2n + 1$$

$$\left. \begin{array}{l} \Sigma = A + B, \text{ если } h + k + l = 2n \\ \Sigma = A - B, \text{ „ } h + k + l = 2n + 1 \end{array} \right\} n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Если  $A$  приблизительно равно  $B$ , то на снимке большей частью не получаются отражения от граней с суммой индексов  $2n + 1$ .

Тип цинковой обманки

4 атома двух родов, каждый размещен в решетке с центрированными гранями: одна относительно другой сдвинута в направлении диагонали куба на  $1/4$ .

$$A(000) \left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right)$$

$$B\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right) \left(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right) \left(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}\right) \left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}\right).$$

$$\Sigma = A [1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(k+l)} + e^{\pi i(h+l)}] +$$

$$+ B \left[ e^{\frac{\pi i}{2}(h+k+l)} + e^{\frac{\pi i}{2}(h+3k+3l)} + e^{\frac{\pi i}{2}(3h+k+3l)} + e^{\frac{\pi i}{2}(3h+3k+l)} \right]$$

$$\Sigma = \left( A + B e^{\frac{\pi i}{2}(h+k+l)} \right) (1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(k+l)} + e^{\pi i(h+l)});$$

2-й множитель представляет собой то же выражение, как и в решетке с центрированными гранями

$$\begin{aligned} \Sigma &= 0, \text{ если } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \Sigma &= 4(A - B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и, если } h + k + l &= 4n + 2 \\ \Sigma &= 4(A + B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одина-} \\ &\quad \text{ковой четности} \\ \text{и, если } h + k + l &= 4n \\ \Sigma &= 4(A \pm iB)^1, \text{ если } h, k, l \text{ числа одина-} \\ &\quad \text{ковой четности} \\ \text{и, если } h + k + l &= 4n \pm 1. \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \Sigma &= 0, \text{ если } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \Sigma &= 4(A - B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \Sigma &= 4(A + B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одина-} \\ &\quad \text{ковой четности} \\ \Sigma &= 4(A \pm iB)^1, \text{ если } h, k, l \text{ числа одина-} \\ &\quad \text{ковой четности} \\ \Sigma &= 4(A + B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одина-} \\ &\quad \text{ковой четности} \end{aligned}} \right\} n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Частный случай: алмаз  $A = B$  дает  $|\Sigma| = 0$  или  $8A$  или  $4A\sqrt{2}$ .

### Тип каменной соли

4 атома, двух родов каждый, размещены в решетке с центрированными гранями, начальные точки которых передвинуты друг относительно друга в направлении диагоналей куба на  $\frac{1}{2}$ .

$$\begin{aligned} A(000) &\left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right) \\ B &\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} 00\right) \left(0 \frac{1}{2} 0\right) \left(00 \frac{1}{2}\right) \\ \Sigma &= (A + Be^{i\pi(h+k+l)}) (1 + e^{i\pi(h+k)} + e^{i\pi(k+l)} + e^{i\pi(h+l)}) \\ \Sigma &= 0, \text{ если } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \Sigma &= 4(A + B), \text{ " } h, k, l \text{ числа одинакой четности} \\ \text{и } h + k + l &= 2n \\ \Sigma &= (4A - B) \text{ " } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и } h + k + l &= 2n + 1 \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \Sigma &= (A + Be^{i\pi(h+k+l)}) (1 + e^{i\pi(h+k)} + e^{i\pi(k+l)} + e^{i\pi(h+l)}) \\ \Sigma &= 0, \text{ если } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \Sigma &= 4(A + B), \text{ " } h, k, l \text{ числа одинакой четности} \\ \Sigma &= (4A - B) \text{ " } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \end{aligned}} \right\} n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

### Тип плавикового шпата

4 атома  $A$  и дважды четыре атома  $B$  заполняют каждую ячейку с центрированными гранями, начальные точки которых сдвинуты в направлении диагоналей куба на  $+\frac{1}{4}$  и  $-\frac{1}{4}$ .

$$\begin{aligned} A(000) &\left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right) \\ B &\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right) \left(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right) \left(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}\right) \left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}\right) \\ B &\left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right) \left(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right) \left(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}\right) \left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}\right) \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Тем самым.  $|\Sigma| = 4\sqrt{(A^2 + B^2)}$

Структурный множитель может быть кратко записан следующим образом.

$$\Sigma = (A + Be^{\frac{\pi i}{2}(h+k+l)} [1 + e^{\pi i(h+k+l)}]) (1 + e^{\pi i(h+h)} + e^{\pi i(h+l)} + e^{\pi i(h+l)}).$$

$\Sigma = 0$ , если  $h, k, l$  числа разной четности.

$$\left. \begin{array}{l} \Sigma = 4(A + 2B), \text{ если } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = 4(A - 2B), \text{ ,, } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = 4A, \text{ ,, } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h + k + l = 4n. \\ h + k + l = 4n + 2. \\ h + k + l = 4n \pm 1. \end{array} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

### Тип куприта

Атомы сорта  $A$  образуют решетку центрированного куба, атомы  $B$  — решетку куба с центрированными гранями, начальные точки обеих решеток сдвинуты на  $\frac{1}{4}$  в направлении диагоналей куба.

$$A(000) \left( \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right) \\ B \left( \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4} \right) \left( \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4} \right) \left( \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4} \right) \left( \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4} \right).$$

$$\Sigma = A(1 + e^{\pi i(h+k+l)}) + Be^{\frac{\pi i}{2}(h+k+l)} (1 + e^{\pi i(h+h)} + e^{\pi i(h+l)} + e^{\pi i(h+l)}).$$

$$\left. \begin{array}{l} \Sigma = 0, \text{ если } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = A, \text{ ,, } h, k, l \text{ числа разной четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = 2A + 4B, \text{ ,, } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = 2A - 4B, \text{ ,, } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \\ \Sigma = 4B, \text{ ,, } h, k, l \text{ числа одинаковой четности} \\ \text{и} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h + k + l = 2n + 1. \\ h + k + l = 2n. \\ h + k + l = 4n. \\ h + k + l = 4n + 2. \\ h + k + l = 4n \pm 1. \end{array} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Гексагональная наиболее плотная шаговая упаковка.

$$2 \text{ одинаковых атома с координатами } (000) \left( \frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{1}{2} \right).$$

$$\Sigma = 1 + e^{\frac{\pi i}{3}(2h + 4k + 3l)} = 1 + e^{\pi i l} e^{\frac{\pi i}{3}(2h + 4k)}.$$

$$\left. \begin{array}{l} \Sigma = 0, \text{ если } l \text{ нечетное число} \\ \text{и} \\ \Sigma = \sqrt{3}, \text{ ,, } l \text{ нечетное число} \\ \text{и} \\ \Sigma = 2, \text{ ,, } l \text{ четное число} \\ \text{и} \\ \Sigma = 1, \text{ ,, } l \text{ четное число} \\ \text{и} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h + 2k = 3n. \\ h + 2k = 3n + 1 \text{ или } 3n + 2. \\ h + 2k = 3n \\ h + 2k = 3n + 1 \text{ или } 3n + 2. \end{array} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

## 10. Условие ромбоэдра

Гексагональная решетка, содержащая в элементарной ячейке еще два атома с гексагональными координатами  $\left(\frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{1}{3}\right)$  и  $\left(\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{2}{3}\right)$ , может быть проще описана с помощью ромбоэдрической решетки.

Структурный множитель в гексагональных координатах равен:

$$\Sigma = 1 + e^{\frac{2\pi i}{3}(h+2k+l)} + e^{\frac{2\pi i}{3}(2h+k+2l)}$$

$$\Sigma = 0, \text{ если } h - k + l = 3n \pm 1, n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

иными словами, если  $h - k + l$  не делится без остатка на число 3, то все линии отсутствуют.

Следовательно, если рентгенограмма гексагонального кристалла содержит только такие линии, для которых при гексагональном индексировании имеют место

$$\left. \begin{array}{l} \text{или } h - k + l = 3n \\ \text{или } k - h + l = 3n \end{array} \right\} n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

(ромбоэдрическое условие), то структура решетки может быть описана ромбоэдрической решеткой.

Вторая форма ромбоэдрического условия, которая может быть получена путем перестановки индексов  $h$  и  $k$ , а именно:

$$k - h + l = 3n,$$

соответствует другой установке ромбоэдра; координаты двух внутренних атомов равны  $\left(\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{3}\right)$  и  $\left(\frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{2}{3}\right)$ .

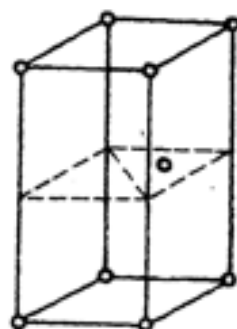


Рис. 86. Ячейка плотнейшей гексагональной решетки.

### ЛИТЕРАТУРНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- R. Glocker. Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 1927 (перевод — 1932 г.).  
 Агеев. Рентгенография металлов и сплавов, 1931.  
 Александр и Хевеши. Химический анализ рентгеновскими лучами, 1933.  
 Zeitschrift für Physik.  
 Zeitschrift für Kristallographie.  
 Annalen der Physik.  
 Zeitschrift für physikalische Chemie  
 Zeitschrift für anorganische Chemie.  
 Zeitschrift für Metallkunde.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ**

## Некоторые числовые значения

$$\begin{aligned}\pi &= 3,14159 \\ \pi^2 &= 9,86960 \\ \pi^3 &= 31,00628 \\ \sqrt{\pi} &= 1,77245 \\ \sqrt[3]{\pi} &= 1,46459 \\ \pi \sqrt{\pi} &= 5,56833 \\ \pi \sqrt{2} &= 4,44288 \\ \frac{\pi}{\sqrt{2}} &= 2,22144 \\ e &= 2,71828 \\ e^2 &= 7,38906 \\ e^3 &= 20,08553 \\ \sqrt{e} &= 1,64872 \\ \sqrt[3]{e} &= 1,39561\end{aligned}$$

# Таблица логарифмов

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>10</b>	0000	0043	0086	0128							4	9	13	17	21	26	30	34	38
					0170	0212	0253	0294	0334	0374	4	8	12	16	20	24	28	32	36
<b>11</b>	0414	0453	0492	0531							4	8	12	15	19	23	27	31	35
					0569	0607	0645	0682	0719	0755	4	7	11	15	19	22	26	30	33
<b>12</b>	0792	0828	0864	0899							3	7	11	14	18	21	25	28	32
					0934	0969	1004	1038	1072	1106	3	7	10	14	17	20	24	27	31
<b>13</b>	1139	1173	1206	1239							3	7	10	13	16	20	23	26	30
					1271	1303	1335	1367	1399	1430	3	7	10	13	16	19	22	25	29
<b>14</b>	1461	1492	1523	1553							3	6	9	12	15	19	22	25	28
					1584	1614	1644	1673	1703	1732	3	6	9	12	15	17	20	23	26
<b>15</b>	1761	1790	1818	1847							3	6	9	11	14	17	20	23	26
					1875	1903	1931	1959	1987	2014	3	6	8	11	14	17	19	22	25
<b>16</b>	2041	2068	2095	2122							3	5	8	11	14	16	19	22	24
					2148	2175	2201	2227	2253	2279	3	5	8	10	13	16	18	21	23
<b>17</b>	2304	2330	2355	2380							3	5	8	10	13	15	18	20	23
					2405	2430	2455	2480	2504	2529	2	5	7	10	12	15	17	20	22
<b>18</b>	2553	2577	2601	2625							2	5	7	9	12	14	16	19	21
					2648	2672	2695	2718	2742	2765	2	5	7	9	11	14	16	18	21
<b>19</b>	2783	2810	2833	2856							2	4	7	9	11	13	16	18	20
					2878	2900	2923	2945	2967	2989	2	4	6	8	11	13	15	17	19
<b>20</b>	3010	3032	3054	3075							2	4	6	8	11	13	15	17	19
<b>21</b>	3222	3243	3263	3284							2	4	6	8	10	12	14	16	18
<b>22</b>	3424	3444	3464	3483							2	4	6	8	10	12	14	15	17
<b>23</b>	3617	3636	3655	3674							2	4	6	7	9	11	13	15	17
<b>24</b>	3802	3820	3838	3856							2	4	5	7	9	11	12	14	16
<b>25</b>	3979	3997	4014	4031							2	3	5	7	9	10	12	14	15
<b>26</b>	4150	4166	4183	4200							2	3	5	7	8	10	11	13	15
<b>27</b>	4314	4330	4346	4362							2	3	5	6	8	9	11	13	14
<b>28</b>	4472	4487	4502	4518							2	3	5	6	8	9	11	12	14
<b>29</b>	4624	4639	4654	4669							1	3	4	6	7	9	10	12	13
<b>30</b>	4771	4786	4800	4814							1	3	4	6	7	9	10	11	13
<b>31</b>	4914	4928	4942	4955							1	3	4	6	7	8	10	11	12
<b>32</b>	5051	5065	5079	5092							1	3	4	5	7	8	9	11	12
<b>33</b>	5185	5198	5211	5224							1	3	4	5	6	8	9	10	12
<b>34</b>	5315	5328	5340	5353							1	3	4	5	6	8	9	10	11
<b>35</b>	5441	5453	5465	5478							1	2	4	5	6	7	9	10	11
<b>36</b>	5563	5575	5587	5599							1	2	4	5	6	7	8	10	11
<b>37</b>	5652	5664	5675	5687							1	2	3	5	6	7	8	9	10
<b>38</b>	5798	5809	5821	5832							1	2	3	5	6	7	8	9	10
<b>39</b>	5911	5922	5933	5944							1	2	3	4	5	7	8	9	10
<b>40</b>	6021	6031	6042	6053							1	2	3	4	5	6	8	9	10
<b>41</b>	6128	6138	6149	6160							1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>42</b>	6232	6243	6253	6263							1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>43</b>	6335	6345	6355	6365							1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>44</b>	6435	6444	6454	6464							1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>45</b>	6532	6542	6551	6561							1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>46</b>	6628	6637	6646	6656							1	2	3	4	5	6	7	7	8
<b>47</b>	6721	6730	6739	6749							1	2	3	4	5	5	6	7	8
<b>48</b>	6812	6821	6830	6839							1	2	3	4	4	5	6	7	8
<b>49</b>	6902	6911	6920	6928							1	2	3	4	4	5	6	7	8

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1 2 3	4 5 6	7 8 9
50	6990	6998	7007	7016	7024	7088	7042	7050	7059	7067	1 2 3	3 4 5	6 7 8
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1 2 3	3 4 5	6 7 8
52	7160	7167	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1 2 2	3 4 5	6 7 7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1 2 2	3 4 5	6 6 7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1 2 2	3 4 5	6 6 7
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474	1 2 2	3 4 5	5 6 7
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	1 2 2	3 4 5	5 6 7
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	1 2 2	3 4 5	5 6 7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701	1 1 2	3 4 4	5 6 7
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	1 1 2	3 4 4	5 6 7
60	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846	1 1 2	3 4 4	5 6 6
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917	1 1 2	3 4 4	5 6 6
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	1 1 2	3 3 4	5 6 6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	1 1 2	3 3 4	5 5 6
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	1 1 2	3 3 4	5 5 6
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189	1 1 2	3 3 4	5 5 6
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	1 1 2	3 3 4	5 5 6
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	1 1 2	3 3 4	5 5 6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	1 1 2	3 3 4	4 5 6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	1 1 2	2 3 4	4 5 6
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506	1 1 2	2 3 4	4 5 6
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	1 1 2	2 3 4	4 5 5
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	1 1 2	2 3 4	4 5 5
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	1 1 2	2 3 4	4 5 5
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	1 1 2	2 3 4	4 5 5
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802	1 1 2	2 3 3	4 5 5
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	1 1 2	2 3 3	4 5 5
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	1 1 2	2 3 3	4 4 5
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	1 1 2	2 3 3	4 4 5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	1 1 2	2 3 3	4 4 5
80	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079	1 1 2	2 3 3	4 4 5
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133	1 1 2	2 3 3	4 4 5
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1 1 2	2 3 3	4 4 5
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238	1 1 2	2 3 3	4 4 5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289	1 1 2	2 3 3	4 4 5
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340	1 1 2	2 3 3	4 4 5
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	1 1 2	2 3 3	4 4 5
87	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	0 1 1	2 2 3	3 4 4
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489	0 1 1	2 2 3	3 4 4
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	0 1 1	2 2 3	3 4 4
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586	0 1 1	2 2 3	3 4 4
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	0 1 1	2 2 3	3 4 4
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	0 1 1	2 2 3	3 4 4
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727	0 1 1	2 2 3	3 4 4
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	0 1 1	2 2 3	3 4 4
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818	0 1 1	2 2 3	3 4 4
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	0 1 1	2 2 3	3 4 4
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	0 1 1	2 2 3	3 4 4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	0 1 1	2 2 3	3 4 4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	0 1 1	2 2 3	3 3 4



# Функции угла через 1°

Углы	Ра- дианы	Хорды	Sin	Tang	Cotang	C. sin			
<b>0°</b>	0	0	0	0	∞	1	1,414	1,5708	<b>90°</b>
1	0175	017	0175	0175	57,2900	9998	1,402	1,5533	89
2	0349	035	0349	0349	28,6363	9994	1,389	1,5359	88
3	0524	052	0523	0524	19,0811	9986	1,377	1,5184	87
4	0698	070	0698	0699	14,3006	9976	1,364	1,5010	86
<b>5</b>	0873	087	0872	0875	11,4301	9962	1,351	1,4835	<b>85</b>
6	1047	105	1045	1051	9,5144	9945	1,338	1,4661	84
7	1222	122	1219	1228	8,1443	9925	1,325	1,4486	83
8	1396	139	1392	1405	7,1154	9903	1,312	1,4312	82
9	1571	157	1564	1584	6,3138	9877	1,299	1,4137	81
<b>10</b>	1745	174	1736	1763	5,6713	9848	1,286	1,3963	<b>80</b>
11	1920	192	1908	1944	5,1446	9816	1,272	1,3788	79
12	2094	209	2079	2126	4,7046	9781	1,259	1,3614	78
13	2269	226	2250	2309	4,3315	9744	1,245	1,3439	77
14	2443	244	2419	2493	4,0108	9703	1,231	1,3265	76
<b>15</b>	2618	261	2588	2679	3,7321	9659	1,217	1,3090	<b>75</b>
16	2793	278	2756	2867	3,4874	9613	1,204	1,2915	74
17	2967	296	294	3057	3,2709	9563	1,190	1,2741	73
18	3142	313	3090	3249	3,0777	9511	1,176	1,2566	72
19	3316	330	3256	3443	2,9042	9455	1,161	1,2392	71
<b>20</b>	3491	347	3420	3640	2,7475	9397	1,147	1,2217	<b>70</b>
21	3665	364	3584	3839	2,6051	9336	1,133	1,2043	69
22	3840	382	3746	4040	2,4751	9272	1,118	1,1868	68
23	4014	399	3907	4245	2,3559	9205	1,104	1,1694	67
24	4189	416	4067	4452	2,2460	9135	1,089	1,1519	66
<b>25</b>	4363	433	4226	4663	2,1445	9063	1,075	1,1345	<b>65</b>
26	4538	450	4384	4877	2,0503	8988	1,060	1,1170	64
27	4712	467	4540	5095	1,9626	8910	1,045	1,0996	63
28	4887	484	4695	5317	1,8807	8829	1,030	1,0821	62
29	5061	501	4843	5543	1,8040	8746	1,015	1,0647	61
<b>30</b>	5236	518	5000	5774	1,7321	8660	1,000	1,0472	<b>60</b>
31	5411	534	5150	6009	1,6643	8572	985	1,0297	59
32	5585	551	5299	6249	1,6003	8480	970	1,0123	58
33	5760	563	5446	6494	1,5399	8387	954	9948	57
34	5934	585	5592	6745	1,4826	8290	939	9774	56
<b>35</b>	6109	601	5736	7002	1,4281	8192	923	9599	<b>55</b>
36	6283	618	5878	7265	1,3764	8090	908	9425	54
37	6458	635	6018	7536	1,3270	7986	892	9250	53
38	6632	651	6157	7813	1,2799	7880	877	9076	52
39	6807	668	6293	8098	1,2349	7771	861	8901	51
<b>40</b>	6981	684	6428	8391	1,1918	7660	845	8727	<b>50</b>
41	7156	700	6561	8693	1,1504	7547	829	8552	49
42	7330	717	6691	9004	1,1106	7431	813	8373	48
43	7505	733	6820	9325	1,0724	7314	797	8203	47
44	7679	749	6947	9657	1,0355	7193	781	8029	46
<b>45</b>	7854	765	7071	10000	1,0000	7071	765	7854	<b>45</b>

Cosin

Cotang

Tang

Sin

Хорды

Радианы

Углы:

# Степени, корни и обратные величины целых чисел (1—100)

$n$	$n^2$	$n^3$	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\sqrt{10n}$	$\sqrt[3]{10n}$	$\sqrt[3]{100n}$	$\frac{1}{n}$
1	1	1	1	1	3,162	2,154	4,642	1
2	4	8	1,414	1,260	4,475	2,714	5,848	5000
3	9	27	1,732	1,442	5,477	3,107	6,694	3333
4	16	64	2	1,587	6,325	3,420	7,368	2500
5	25	125	2,236	1,710	7,071	3,684	7,937	2000
6	36	216	2,449	1,817	7,746	3,915	8,434	1667
7	49	343	2,646	1,913	8,367	4,121	8,879	1429
8	64	512	2,828	2,000	8,944	4,309	9,283	1250
9	81	729	3,000	2,080	9,487	4,481	9,655	1111
10	100	1000	3,162	2,154	10,0	4,642	10,000	1000
11	121	1331	3,317	2,224	10,488	4,791	10,323	09091
12	144	1728	3,464	2,289	10,954	4,932	10,627	08333
13	169	2197	3,606	2,351	11,402	5,066	10,914	07692
14	196	2744	3,742	2,410	11,832	5,192	11,187	07143
15	225	3375	3,873	2,466	12,247	5,313	11,447	06667
16	256	4096	4,000	2,520	12,649	5,429	11,696	06250
17	289	4913	4,123	2,571	13,038	5,540	11,935	05882
18	324	5832	4,243	2,621	13,416	5,646	12,164	05556
19	361	6859	4,359	2,668	13,784	5,749	12,386	05263
20	400	8000	4,472	2,714	14,142	5,848	12,599	0500
21	441	9261	4,583	2,759	14,491	5,944	12,806	04762
22	484	10648	4,690	2,802	14,832	6,037	13,006	04545
23	529	12167	4,796	2,844	15,166	6,127	13,200	04348
24	576	13824	4,899	2,884	15,492	6,214	13,389	04167
25	625	15625	5,000	2,924	15,811	6,300	13,572	0400
26	676	17576	5,099	2,962	16,125	6,383	13,751	03846
27	729	19683	5,196	3,000	16,432	6,463	13,925	03704
28	784	21952	5,292	3,037	16,733	6,542	14,095	03571
29	841	24389	5,385	3,072	17,029	6,619	14,260	03448
30	900	27000	5,477	3,107	17,321	6,694	14,422	03333
31	961	29791	5,568	3,141	17,607	6,768	14,581	03226
32	1024	32768	5,657	3,175	17,889	6,840	14,736	03125
33	1089	35937	5,745	3,208	18,166	6,910	14,888	03030
34	1156	39304	5,831	3,240	18,439	6,980	15,037	02941
35	1225	42875	5,916	3,271	18,708	7,047	15,183	02857
36	1296	46656	6,000	3,302	18,974	7,114	15,326	02278
37	1369	50653	6,083	3,332	19,235	7,179	15,467	02703
38	1444	54872	6,164	3,362	19,494	7,243	15,605	02632
39	1521	59319	6,245	3,391	19,748	7,306	15,741	02564
40	1600	64000	6,325	3,420	20,00	7,368	15,874	0250
41	1681	68921	6,403	3,448	20,248	7,429	16,005	02439
42	1764	74088	6,481	3,476	20,494	7,489	16,134	02381
43	1849	79507	6,557	3,503	20,736	7,548	16,261	02326
44	1936	85184	6,633	3,530	20,976	7,605	16,385	02273
45	2025	91125	6,708	3,557	21,213	7,663	16,510	02222
46	2116	97336	6,782	3,583	21,448	7,719	16,631	02174
47	2209	103823	6,856	3,609	21,679	7,775	16,751	02128
48	2304	110592	6,928	3,634	21,909	7,830	16,869	02083
49	2401	117649	7,000	3,659	22,136	7,884	16,985	02041
50	2500	125000	7,071	3,684	23,361	7,937	17,100	020

# Степени, корни и обратные величины

$n$	$n^2$	$n^3$	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\sqrt{10n}$	$\sqrt[3]{10n}$	$\sqrt[3]{100n}$	$\frac{1}{n}$
51	2601	132651	7,141	3,708	22,583	7,990	17,213	01961
52	2704	140608	7,211	3,733	22,804	8,041	17,325	01923
53	2809	148877	7,280	3,758	23,022	8,093	17,435	01887
54	2916	157464	7,348	3,780	23,238	8,143	17,544	01852
55	3025	166375	7,416	3,803	23,452	8,193	17,652	01818
56	3136	175616	7,483	3,826	23,664	8,243	17,758	01786
57	3249	185193	7,550	3,849	23,873	8,291	17,863	01754
58	3364	195112	7,616	3,871	24,083	8,340	17,967	01724
59	3481	205379	7,681	3,893	24,290	8,387	18,070	01695
60	3600	216000	7,746	3,915	24,495	8,434	18,171	01667
61	3721	226981	7,810	3,936	24,698	8,481	18,272	01639
62	3844	238328	7,874	3,958	24,900	8,527	18,371	01613
63	3969	250047	7,937	3,979	25,100	8,573	18,469	01587
64	4096	262144	8,000	4,000	25,298	8,618	18,566	01562
65	4225	274625	8,062	4,021	25,495	8,662	18,663	01538
66	4356	287496	8,124	4,041	25,690	8,707	18,758	01515
67	4489	300763	8,185	4,062	25,884	8,750	18,852	01493
68	4624	314432	8,246	4,082	26,077	8,794	18,945	01471
69	4761	328509	8,307	4,102	26,268	8,837	19,038	01449
70	4900	343000	8,367	4,121	26,458	8,879	19,129	01429
71	5041	357911	8,426	4,141	26,646	8,921	19,220	01408
72	5184	373248	8,485	4,160	26,833	8,963	19,310	01389
73	5329	389017	8,544	4,179	27,019	9,004	19,399	01370
74	5476	405224	8,602	4,198	27,203	9,045	19,487	01351
75	5625	421875	8,660	4,217	27,386	9,086	19,574	01333
76	5776	438976	8,718	4,236	27,568	9,126	19,661	01316
77	5929	456533	8,775	4,254	27,749	9,166	19,747	01299
78	6084	474552	8,832	4,273	27,928	9,205	19,832	01282
79	6241	493039	8,888	4,291	28,107	9,244	19,916	01266
80	6400	512000	8,944	4,309	28,284	9,283	20,000	01250
81	6561	531441	9,000	4,327	28,460	9,322	20,083	01235
82	6724	551368	9,055	4,344	28,636	9,360	20,165	01220
83	6889	571787	9,110	4,362	28,810	9,398	20,247	01205
84	7056	592704	9,165	4,380	28,983	9,435	20,328	01190
85	7225	614125	9,220	4,397	29,155	9,473	20,408	01176
86	7396	636056	9,274	4,414	29,326	9,510	20,488	01163
87	7569	658503	9,327	4,431	29,496	9,546	20,567	01149
88	7744	681472	9,381	4,448	29,665	9,583	20,646	01136
89	7921	704969	9,434	4,465	29,833	9,619	20,724	01124
90	8100	729000	9,487	4,481	30,000	9,655	20,801	01111
91	8281	753571	9,539	4,498	30,166	9,691	20,878	01099
92	8464	778688	9,592	4,514	30,332	9,726	20,954	01087
93	8649	804357	9,644	4,531	30,496	9,761	21,029	01075
94	8836	830584	9,695	4,547	30,659	9,796	21,105	01064
95	9025	857375	9,747	4,563	30,822	9,830	21,179	01053
96	9216	884736	9,798	4,579	30,984	9,865	21,253	01042
97	9409	912673	9,849	4,595	31,145	9,899	21,327	01031
98	9604	941192	9,899	4,610	31,305	9,933	21,400	01020
99	9801	970299	9,950	4,626	31,464	9,967	21,472	01010
100	10000	1000000	10,000	4,642	31,623	10,000	21,544	0100

Таблица значений показательных и гиперболических функций

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$\text{Sinh } x$	$\text{Cosh } x$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$\text{Sinh } x$	$\text{Cosh } x$
0,02	1,0202	9802	0200	1,0002	1,0	2,7183	3679	1,1752	1,543
0,04	1,0408	9603	0400	1,0008	1,1	3,0042	3329	1,3356	1,668
0,06	1,0618	9418	0600	1,0018	1,2	3,3201	3012	1,5095	1,810
0,08	1,0833	9231	0801	1,0032	1,3	3,6693	2725	1,6984	1,970
0,10	1,1052	9048	1002	1,0050	1,4	4,0552	2466	1,9043	2,150
0,11	1,1163	8958	1102	1,0061	1,5	4,4817	2231	2,1293	2,352
0,12	1,1275	8869	1203	1,0072	1,6	4,9530	2019	2,3756	2,5775
0,13	1,1388	8781	1304	1,0085	1,7	5,4739	1827	2,6456	2,8280
0,14	1,1503	8694	1405	1,0098	1,8	6,0497	1653	2,9422	3,107
0,15	1,1618	8607	1506	1,0113	1,9	6,6859	1496	3,2682	3,417
0,16	1,1735	8521	1607	1,0128	2,0	7,3891	1353	3,6269	3,762
0,17	1,1853	8437	1708	1,0145	2,1	8,1662	1225	4,0219	4,1443
0,18	1,1972	8353	1810	1,0162	2,2	9,0250	1108	4,4571	4,5670
0,19	1,2092	8270	1911	1,0181	2,3	9,9742	1003	4,9370	5,037
0,20	1,2214	8187	2013	1,0201	2,4	11,023	0907	5,4662	5,556
0,21	1,2337	8106	2115	1,0221	2,5	12,182	0821	6,0502	6,132
0,22	1,2461	8025	2218	1,0243	2,6	13,464	0743	6,6947	6,769
0,23	1,2586	7945	2320	1,0266	2,7	14,880	0672	7,4063	7,473
0,24	1,2712	7866	2423	1,0289	2,8	16,445	0608	8,1919	8,252
0,25	1,2840	7788	2526	1,0314	2,9	18,174	0550	9,0596	9,1146
0,26	1,2969	7711	2629	1,0340	3,0	20,085	0498	10,018	10,068
0,27	1,3100	7634	2733	1,0367	3,1	22,198	0450	11,076	11,121
0,28	1,3231	7558	2837	1,0395	3,2	24,532	0408	12,246	12,287
0,29	1,3364	7483	2941	1,0423	3,3	27,113	0369	13,538	13,575
0,30	1,3499	7408	3045	1,0453	3,4	29,964	0334	14,965	14,999
0,31	1,3634	7335	3150	1,0484	3,5	33,115	0302	16,543	16,57
0,32	1,3771	7261	3255	1,0516	3,6	36,598	0273	18,285	18,313
0,33	1,3910	7189	3360	1,0550	3,7	40,447	0247	20,211	20,236
0,34	1,4050	7118	3466	1,0584	3,8	44,701	0224	22,339	22,362
0,35	1,4191	7047	3572	1,0619	3,9	49,402	0202	24,691	24,711
0,36	1,4333	6977	3678	1,0655	4,0	54,598	0183	27,290	27,308
0,37	1,4477	6907	3785	1,0692	4,1	60,340	0166	30,162	30,179
0,38	1,4623	6839	3892	1,0731	4,2	66,686	0150	33,336	33,351
0,39	1,4770	6771	4000	1,0770	4,3	73,700	0136	36,843	36,857
0,40	1,4918	6703	4107	1,0811	4,4	81,451	0123	40,719	40,732
0,41	1,5068	6636	4216	1,0852	4,5	90,017	0111	45,003	45,014
0,42	1,5220	6570	4325	1,0895	4,6	99,484	0100	49,737	49,747
0,43	1,5373	6505	4434	1,0939	4,7	109,95	00910	54,969	54,976
0,44	1,5527	6440	4543	1,0984	4,8	121,51	00823	60,751	60,759
0,45	1,5683	6376	4653	1,1030	4,9	134,29	00745	67,141	67,149
0,46	1,5841	6313	4764	1,1077	5,0	148,41	00674	74,203	74,210
0,47	1,6000	6250	4875	1,1125	5,1	164,02	00610	82,008	82,014
0,48	1,6161	6188	4986	1,1174	5,2	181,27	00552	90,633	90,639
0,49	1,6323	6126	5098	1,1225	5,3	200,34	00499	100,17	100,17
0,50	1,6487	6065	5211	1,1276	5,4	221,41	00452	110,70	110,71
0,6	1,8221	5488	6366	1,1855	5,5	244,69	00409	122,34	122,35
0,7	2,0138	4966	7576	1,2552	5,6	270,43	00370	135,21	135,21
0,8	2,2255	4493	8881	1,3374	5,7	298,87	00335	149,43	149,42
0,9	2,4596	4066	1,0285	1,4331	5,8	330,30	00303	165,15	165,15
					5,9	365,04	00274	182,52	182,52
					6,0	403,43	00248	201,71	201,72

# Таблица значений функций $e^{-x}$ для $x > 5,0$

$x$	$e^x$	$x$	$e^x$
5,0	$67,4 \cdot 10^{-4}$	26	$51,0 \cdot 10^{-12}$
6,0	$24,8 \cdot 10^{-4}$	27	$19,0 \cdot 10^{-12}$
7,0	$91,0 \cdot 10^{-5}$	28	$69,0 \cdot 10^{-14}$
8,0	$33,0 \cdot 10^{-5}$	29	$25,0 \cdot 10^{-14}$
9,0	$12,0 \cdot 10^{-6}$	30	$93,0 \cdot 10^{-15}$
10	$45,0 \cdot 10^{-7}$	31	$34,0 \cdot 10^{-15}$
11	$17,0 \cdot 10^{-8}$	32	$13,0 \cdot 10^{-15}$
12	$61,0 \cdot 10^{-7}$	33	$46,0 \cdot 10^{-18}$
13	$23,0 \cdot 10^{-7}$	34	$17,0 \cdot 10^{-15}$
14	$83,0 \cdot 10^{-8}$	35	$63,0 \cdot 10^{-17}$
15	$30,0 \cdot 10^{-8}$	36	$23,0 \cdot 10^{-17}$
16	$11,0 \cdot 10^{-8}$	37	$85,0 \cdot 10^{-18}$
17	$41,0 \cdot 10^{-9}$	38	$31,0 \cdot 10^{-18}$
18	$15,0 \cdot 10^{-9}$	39	$11,0 \cdot 10^{-18}$
19	$56,0 \cdot 10^{-10}$	40	$42,0 \cdot 10^{-19}$
20	$21,0 \cdot 10^{-10}$	41	$16,0 \cdot 10^{-19}$
21	$76,0 \cdot 10^{-11}$	42	$57,0 \cdot 10^{-20}$
22	$28,0 \cdot 10^{-11}$	43	$21,0 \cdot 10^{-20}$
23	$10,0 \cdot 10^{-11}$	44	$78,0 \cdot 10^{-21}$
24	$38,0 \cdot 10^{-12}$	45	$29,0 \cdot 10^{-21}$
25	$14,0 \cdot 10^{-12}$		

## Ряды

### а. Биномиальные ряды

Бином вида  $(1 \pm x)^n$  при  $x < 1$  и любом вещественном значении  $n$  представляется рядом

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm \frac{n}{1} x + \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} x^2 \pm \frac{n \cdot (n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} x^3 + \dots$$

Если  $n > 1$ , то ряд конечный и имеет  $(n + 1)$  член

При  $n < 1$ , то ряд бесконечный.

В большинстве случаев достаточную точность можно получить, взяв 2 или 3 члена разложения, если  $x$  не превосходит некоторого определенного числа

$$\sqrt{1 \pm x} = 1 + \frac{1}{2} x, \text{ абсолютная погрешность } \alpha < 0,01, \text{ если } x \leq 0,3$$

$$\sqrt[3]{1 \pm x} = 1 \pm \frac{1}{3} x, \alpha < 0,01, \text{ если } x \leq 0,3$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 \pm x}} = 1 \pm \frac{1}{2} x, \alpha < 0,01, \text{ если } x \leq 0,15$$

$$\frac{1}{\sqrt[3]{1 \pm x}} = 1 \pm \frac{1}{3} x, \alpha < 0,01, \text{ если } x \leq 0,2$$

$$\frac{1}{1 \pm x} = 1 \mp x, \quad \alpha < 0,01, \quad \text{если } x \leq 0,14$$

$$\frac{1}{(1 \pm x)^2} \approx 1 \mp 2x, \quad \alpha < 0,01, \quad \text{если } x \leq 0,08$$

$$\frac{1}{(1 \pm x)^3} \approx 1 \mp 3x, \quad \alpha < 0,01, \quad x \leq 0,05$$

### б. Показательные и логарифмические функции

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad |x| < \infty$$

$$e^{\pm x} \approx 1 \pm x, \quad \text{причем } \alpha < 0,001, \quad \text{если } x \leq 0,06$$

$$e^{+x} \approx 1 + x + \frac{x^2}{2} \quad \text{,, ,, ,, ,, } \quad x \leq 0,11.$$

$$a^x = 1 + \ln a \cdot x + \frac{(\ln a)^2}{2!} x^2 + \frac{(\ln a)^3}{3!} x^3 + \dots \quad |x| < \infty \quad a > 0$$

$$\ln(1 \pm x) = \pm x - \frac{x^2}{2} \pm \frac{x^3}{3} - \dots \quad -1 < x < 1$$

$$\ln \frac{1+x}{1-x} = 2 \left( x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \dots \right) \quad |x| > 1$$

$$\ln \frac{x+1}{x-1} = 2 \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{3x^3} + \frac{1}{5x^5} + \dots \right) \quad |x| > 1$$

$$\ln x = 2 \left[ \frac{x-1}{x+1} + \frac{1}{3} \left( \frac{x-1}{x+1} \right)^3 + \frac{1}{5} \left( \frac{x-1}{x+1} \right)^5 + \dots \right] \quad |x| > 0$$

### в. Тригонометрические круговые и гиперболические функции

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots \quad x < \infty$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots \quad x < \infty$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2}{15} x^5 + \frac{17}{315} x^7 \quad -\frac{\pi}{2} < x < \frac{\pi}{2}$$

$$\operatorname{ctg} x = \frac{1}{x} - \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} - \frac{2}{945} x^5 \quad -\pi < x < \pi$$

приблизительно  $\sin x \approx x$ , причем  $\alpha < 0,001$ , если  $x \leq 0,12 \approx 6^\circ 46'$

„  $\sin x \approx x - \frac{x^3}{6}$  „ „ „  $x \leq 0,74 \approx 42^\circ 37'$

„  $\cos x \approx 1$  „ „ „  $x \leq 0,04 \approx 2^\circ 30'$

„  $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$  „ „ „  $x \leq 0,46 \approx 26^\circ 28'$

„  $\operatorname{tg} x \approx x$  „ „ „  $x \leq 0,01 \approx 0^\circ 34'$

„  $\operatorname{tg} x \approx x + \frac{x^3}{3}$  „ „ „  $x \leq 0,43 \approx 24^\circ 28'$

$$\operatorname{arcsin} x = x + \frac{x^3}{2 \cdot 3} + \frac{3x^5}{2 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{3 \cdot 5 \cdot x^7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} + \dots \quad |x| \leq 1$$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots \quad |x| \leq 1$$

$$\operatorname{sh} x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \quad |x| < \infty$$

$$\operatorname{ch} x = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \quad |x| < \infty$$

## Соотношения между круговыми, гиперболическими и показательными функциями в комплексной форме

$$\operatorname{sh} x = \frac{1}{2} (e^x - e^{-x}) \quad \operatorname{ch} x + \operatorname{sh} x = e^x$$

$$\operatorname{ch} x = \frac{1}{2} (e^x + e^{-x}) \quad \operatorname{ch} x - \operatorname{sh} x = e^{-x}$$

$$\operatorname{ch}^2 x - \operatorname{sh}^2 x = 1 \quad \operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$$

$$\operatorname{th} x \operatorname{cth} x = 1$$

$$\left. \begin{aligned} e^{ix} &= \cos x + i \sin x \\ e^{-ix} &= \cos x - i \sin x \end{aligned} \right\}$$

$$e^z = e^{x+iy} = e^x (\cos y + i \sin y) = r (\cos \theta + i \sin \theta),$$

где

$$r = e^x$$

и

$$\theta = y + 2k\pi$$

$$\sin x = \frac{1}{2i} (e^{ix} - e^{-ix}),$$

$$\cos x = \frac{1}{2} (e^{ix} + e^{-ix}),$$

$$\sin ix = i \operatorname{sh} x \quad \operatorname{sh} ix = i \sin x$$

$$\cos ix = \operatorname{ch} x \quad \operatorname{ch} ix = \cos x$$

$$\operatorname{tg} ix = i \operatorname{th} x \quad \operatorname{th} ix = i \operatorname{tg} x$$

$$\operatorname{ctg} ix = i \operatorname{cth} x \quad \operatorname{cth} ix = i \operatorname{ctg} x$$

При вещественных значениях  $x$   $\operatorname{sh} x$  принимает любые положительные и отрицательные значения  $\operatorname{ch} x \geq 1$ ,  $\operatorname{th}^2 x < 1$ ,  $\operatorname{cth}^2 x > 1$ .

При изменении знака аргумента  $x$ .

$$\operatorname{sh}(-x) = -\operatorname{sh} x \quad \operatorname{ch}(-x) = \operatorname{ch} x$$

Преобразование комплексного числа из одной формы в другую:

$$Z = a + bi = r (\cos y + i \sin y) = r e^{-iy} = e^{x-iy},$$

где

$$r = \sqrt{a^2 + b^2},$$

$$\cos y = \frac{a}{r},$$

$$\sin y = \frac{b}{r},$$

$$x = \ln r$$

или

$$r = e^x.$$

### Производные некоторых функций

$$(x^m)' = mx^{m-1}; (\sin x)' = \cos x; (\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}; (\operatorname{sh} x)' = \operatorname{ch} x$$

$$(e^x)' = e^x; (\cos x)' = -\sin x; (\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}; (\operatorname{ch} x)' = \operatorname{sh} x$$

$$(a^x)' = a^x \ln a; (\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}; (\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}; (\operatorname{th} x)' = \frac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$$

$$(\ln x)' = \frac{1}{x}; (\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}; (\operatorname{arcc} \operatorname{tg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}; (\operatorname{cth} x)' = -\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$$

$$a \ln x = \frac{1}{x \ln a}$$

$$d \ln \sin x = \operatorname{ctg} x dx$$

$$d \ln \cos x = -\operatorname{tg} x dx$$

$$d \ln \operatorname{tg} x = \frac{2 dx}{\sin 2x}$$

$$d \ln \operatorname{ctg} x = -\frac{2 dx}{\sin 2x}$$

$$d(x^y) = x^{y-1}(x \ln x \cdot dy + y dx).$$

## Некоторые неопределенные интегралы

### а. Интегралы простейших функций

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$$

для  $n$  — целого или дробного за исключением  $n = -1$ .

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x + C$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C$$

$$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \operatorname{arcsin} x + C = -\operatorname{arccos} x + C$$

$$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C = -\operatorname{arcc} \operatorname{tg} x + C$$

$$\int \operatorname{sh} x \cdot dx = \operatorname{ch} x + C$$

$$\int \operatorname{ch} x dx = \operatorname{sh} x + C$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{ch}^2 x} = \operatorname{th} x + C$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{sh}^2 x} = -\operatorname{cth} x + C$$



О П Е Ч А Т К И

<i>Страница</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>
214	2 сверху	$(\operatorname{arccotg}) x$	$(\operatorname{arccotg} x)'$
214	3 ..	$a \ln x =$	$(a \lg x)' =$

Справочн. по рентгеном.

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} = \operatorname{ar sh} x + C = \ln(x + \sqrt{1+x^2}) + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2-1}} = \operatorname{ar ch} x + C = \ln(x + \sqrt{x^2-1}) + C$$

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{1-x^2} &= \operatorname{ar th} x + C = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} + C = \operatorname{arcth} x + c = \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{x+1}{x-1} + c \end{aligned}$$

## 6. Интегралы рациональных функций

$$\int (a+bx)^n dx = \frac{(a+bx)^{n+1}}{(n+1)b} + C \quad (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{a+bx} = \frac{1}{b} \ln(a+bx) + C = \frac{1}{b} \ln C \cdot (a+bx)$$

$$\int \frac{x dx}{a+bx} = \frac{1}{b^2} [a+bx - a \ln(a+bx)] + C$$

$$\int \frac{x^2 dx}{a+bx} = \frac{1}{b^3} \left[ \frac{1}{2} (a+bx)^2 - 2a(a+bx) + a^2 \ln(a+bx) \right] + C$$

$$\int \frac{dx}{x(a+bx)} = -\frac{1}{a} \ln \frac{a+bx}{x} + C$$

$$\int \frac{dx}{(a+bx)^2} = -\frac{1}{b(a+bx)} + C$$

$$\int \frac{x dx}{(a+bx)^2} = \frac{1}{b^2} \left[ \ln(a+bx) + \frac{a}{a+bx} \right] + C$$

$$\int \frac{x^2 dx}{(a+bx)^2} = \frac{1}{b^3} \left[ a+bx - 2a \ln(a+bx) - \frac{a^2}{a+bx} \right] + C$$

$$\int \frac{dx}{x(a+bx)^2} = \frac{1}{a(a+bx)} - \frac{1}{a^2} \ln \frac{a+bx}{x} + C$$

$$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C$$

$$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x} + C.$$

$$\int \frac{dx}{1-x^2} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} + C = \operatorname{Ar th} x + C, \text{ если } x < 1.$$

$$\int \frac{dx}{x^2-1} = \frac{1}{2} \ln \frac{x-1}{x+1} + C = -\operatorname{Arcth} x + C, \text{ если } x > 1.$$

$$\int \frac{dx}{a+bx^2} = \frac{1}{\sqrt{a \cdot b}} \operatorname{arctg} \left( x \sqrt{\frac{b}{a}} \right) + C, \text{ если } ab > 0.$$

$$\int \frac{dx}{a-bx^2} = \frac{1}{2\sqrt{ab}} \ln \frac{\sqrt{ab}+bx}{\sqrt{ab}-bx} + C = \frac{1}{\sqrt{ab}} \operatorname{ar th} \left( x \sqrt{\frac{b}{a}} \right) + C,$$

если  $ab < 0$ .

## в. Интегралы иррациональных функций

$$\int \sqrt{a+bx} dx = \frac{2}{3b} (\sqrt{a+bx})^3 + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a+bx}} = \frac{2}{b} \sqrt{a+bx} + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C = -\arccos \frac{x}{a} +$$

$$+ C = 2 \arctg \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2+x^2}} = \ln(x + \sqrt{a^2+x^2}) + C = \frac{1}{2} \ln \frac{x + \sqrt{a^2+x^2}}{-x + \sqrt{a^2+x^2}} +$$

$$+ C = \operatorname{Arsh} \frac{x}{a} + C.$$

$$\int \sqrt{a^2+x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a^2+x^2} + \frac{a^2}{2} \ln(x + \sqrt{a^2+x^2}) + C =$$

$$= \frac{x}{2} \sqrt{a^2+x^2} + \frac{a^2}{2} \operatorname{Arsh} \frac{x}{a} + C.$$

$$\int \sqrt{a-x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a-x^2} + \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{x}{a} + C.$$

$$\int \sqrt{x^2-a^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{x^2-a^2} - \frac{a^2}{2} \ln(x + \sqrt{x^2-a^2}) + C =$$

$$= \frac{x}{2} \sqrt{x^2-a^2} - \frac{a^2}{2} \operatorname{Arch} \frac{x}{a} + C.$$

## г. Интегралы трансцендентных функций

$$\int x^n \cdot e^x dx = e^x [x^n - nx^{n-1} + n(n-1)x^{n-2} + \dots + (-1)^n n!].$$

$$\int \ln x dx = x \ln x - x + C.$$

$$\int (\ln x)^n dx = \int y^n e^y dy, \text{ где } y = \ln x.$$

$$\int x^n \cdot \ln x dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \ln x - \frac{x^{n+1}}{(n+1)^2} + C.$$

$$\int \frac{1}{x} \ln x dx = \frac{1}{2} (\ln x)^2 + C.$$

$$\int \frac{(\ln x)^n}{x} dx = \frac{1}{n+1} (\ln x)^{n+1} + C.$$

$$\int \frac{dx}{x \ln x} = \ln(\ln x) + C.$$

$$\int e^{nx} \ln x dx = x^{n+1} \left[ \frac{\ln x}{n+1} - \frac{1}{(n+1)^2} \right] + C.$$

$$\int \sin^2 x dx = -\frac{1}{4} \sin 2x + \frac{1}{2} x + C.$$

$$\int \cos^2 x \cdot dx = \frac{1}{4} \sin 2x + \frac{1}{2} x + C.$$

$$\int \sin mx \cdot x \, dx = -\frac{\cos mx}{m} + C.$$

$$\int \cos mx \cdot dx = \frac{\sin mx}{m} + C.$$

$$\int \operatorname{tg} x \cdot dx = -\ln \cos x + C.$$

$$\int \operatorname{ctg} x \cdot dx = \ln \sin x + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \operatorname{tg} \frac{x}{2} + C.$$

$$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln \operatorname{tg} \left( \frac{x}{4} + \frac{x}{2} \right) + C.$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{sh} x} = 2 \operatorname{arc th} (e^x) + C.$$

$$\int \frac{dx}{\operatorname{ch}_1 x} = 2 \operatorname{arc tg} (e^x) + C.$$

$$\int \frac{dx}{1 + \cos x} = \operatorname{tg} \frac{x}{2} + C.$$

$$\int \frac{dx}{1 - \cos x} = -\operatorname{ctg} \frac{x}{2} + C.$$

$$\int \sin x \cdot \cos x \cdot dx = \frac{1}{2} \sin^2 x + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sin x \cdot \cos x} = \ln \operatorname{tg} x + C.$$

$$\int \sin^n x \, dx = -\frac{\cos x \cdot \sin^{n-1} x}{n} + \frac{n-1}{n} \int \sin^{n-2} x \cdot dx + C.$$

$$\int \cos^n x \, dx = \frac{\sin x \cdot \cos^{n-1} x}{n} + \frac{n-1}{n} \int \cos^{n-2} x \cdot dx + C.$$

$$\int \operatorname{tg}^n x \, dx = \frac{\operatorname{tg}^{n-1} x}{n-1} - \int \operatorname{tg}^{n-2} x \cdot dx + C.$$

$$\int \operatorname{ctg}^n x \, dx = -\frac{\operatorname{ctg}^{n-1} x}{n-1} - \int \operatorname{ctg}^{n-2} x \cdot dx + C.$$

$$\int \frac{dx}{\sin^n x} = -\frac{\cos x}{(n-1) \sin^{n-1} x} + \frac{n-2}{n-1} \int \frac{dx}{\sin^{n-2} x} + C.$$

$$\int \frac{dx}{\cos^n x} = \frac{\sin x}{(n-1) \cos^{n-1} x} + \frac{n-2}{n-1} \int \frac{dx}{\cos^{n-2} x} + C.$$

$$\int x^m \sin x \cdot dx = -x^m \cos x + m \int x^{m-1} \cos x \cdot dx + C.$$

$$\int x^m \cos x \, dx = x^m \sin x - m \int x^{m-1} \sin x \cdot dx + C.$$

$$\int e^{ax} \sin bx \cdot dx = \frac{a \sin bx - b \cos bx}{a^2 + b^2} \cdot e^{ax} + C.$$

$$\int e^{ax} \cos bx \, dx = \frac{a \cos bx + b \sin bx}{a^2 + b^2} \cdot e^{ax} + C.$$

$$\int \arcsin x \, dx = x \cdot \arcsin x + \sqrt{1-x^2} + C.$$

$$\int \arccos x \, dx = x \arccos x - \sqrt{1-x^2} + C.$$

$$\int \operatorname{arctg} x \, dx = x \operatorname{arctg} x - \frac{1}{2} \ln(1+x^2) + C.$$

$$\int \operatorname{arccotg} x \, dx = \operatorname{arccotg} x + \frac{1}{2} \ln(1+x^2) + C.$$

## Приближенное вычисление определенных интегралов

Для нахождения численного значения  $\int_a^b f(x) \, dx$  промежуток  $(a, b)$  делится на  $n$  равных частей, отграниченных значениями  $x_i = a + ih$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$  и  $h = \frac{b-a}{n}$ . При разделении промежутка  $(a, b)$  на  $2n$  частей значения  $x$ , лежащие между  $x_{i-1}$  и  $x_i$ , обозначены через  $x_{i-\frac{1}{2}}$ . Значения функции  $f(x_i)$  обозначены через  $y_i$ .

$$(1) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{n} [y_0 + y_1 + \dots + y_{n-1}] \quad (\text{Формула прямоугольников по недостатку})$$

$$(2) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{n} [y_1 + y_2 + \dots + y_n] \quad (\text{Формула прямоугольников по избытку})$$

$$(3) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{2n} [y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{n-1} + y_n] \quad (\text{Формула трапеций})$$

$$(4) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{n} [y_{\frac{1}{2}} + y_{\frac{3}{2}} + \dots + y_{n-\frac{1}{2}}] \quad (\text{Формула касательных})$$

$$(5) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{2n} \left[ \frac{y_0 + y_n}{4} - \frac{y_{\frac{1}{2}} + y_{n-\frac{1}{2}}}{4} + 2y_{\frac{1}{2}} + 2y_{\frac{3}{2}} + \dots \right. \\ \left. \dots + 2y_{n-\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{Формула Понселе})$$

$$(6) \int_a^b f(x) \, dx = \frac{b-a}{6n} [y_0 + 4y_{\frac{1}{2}} + 2y_1 + 4y_{\frac{3}{2}} + 2y_2 + \dots \\ \dots + 2y_{n-1} + 4y_{n-\frac{1}{2}} + y_n] \quad (\text{Формула Симпсона})$$

# О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

## Отдел I

### ОБЩИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

1. Единицы измерений . . . . .	7
2. Соотношения между различными единицами измерений . . . . .	7
3. Разные величины . . . . .	11
4. Механические величины . . . . .	12
5. Газы . . . . .	18
6. Жидкости . . . . .	18
7. Твердые тела . . . . .	20
8. Оптические свойства тел . . . . .	22
9. Таблицы атомных весов химических элементов . . . . .	24

## Отдел II

### РЕНТГЕНОВСКАЯ АППАРАТУРА

1. Электротехнические величины и зависимости . . . . .	31
2. Рентгеновские трубки и аппараты . . . . .	48
3. Спектрометры . . . . .	50
4. Рентгенметры . . . . .	55

## Отдел III

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОМЕТРИИ (СТАНДАРТЫ)

<u>ОСТ</u> <u>ВКС</u>	6350. Основные понятия, термины и обозначения в области рентгеновских лучей . . . . .	67
<u>ОСТ</u> <u>ВКС</u>	7623. Единицы рентгеновского излучения . . . . .	71
<u>ОСТ</u> <u>ВКС</u>	7770. Рентгенометрия . . . . .	74

## Отдел IV

### РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

1. Рентгеновские спектры . . . . .	81
2. Энергетические величины и соотношения . . . . .	95
3. Поглощение и рассеяние рентгеновских лучей . . . . .	96
4. Качество излучения . . . . .	112
5. Действие рентгеновских лучей . . . . .	119
6. Физическая доза и биологическое действие рентгеновских лучей . . . . .	132
7. Защита от рентгеновских лучей . . . . .	142

## РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ

1.	Анализ поглощением . . . . .	151
2.	Качественный анализ . . . . .	157
3.	Количественный анализ . . . . .	167
4.	Анализ структуры вещества . . . . .	170
	а) Метод Дебай-Шерер для поликристаллических агрегатов . . . . .	170
	б) Метод вращения кристаллов для монокристаллов . . . . .	181
	в) Метод Лауэ . . . . .	188
	г) Текстурдиаграммы . . . . .	187
§ 5.	Кристаллографические формулы . . . . .	192
Приложение. Математические величины . . . . .		203