

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

РЕНТГЕНОТЕХНИКА

РАБОТА 1

ИЗУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК И АППАРАТОВ

РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРУБКИ

Рентгеновская трубка является источником рентгеновских лучей, возникающих в ней в результате взаимодействия быстро летящих электронов с атомами анода, установленного на пути электронов.

Для возбуждения рентгеновского излучения в рентгеновских трубках должно быть обеспечено:

- а) получение свободных электронов;
- б) сообщение свободным электронам большой кинетической энергии (от нескольких тысяч до 1—2 миллионов электронвольт);
- в) взаимодействие быстро летящих электронов с атомами анода.

Рентгеновские трубки классифицируют по следующим признакам:

1. По способу получения свободных электронов. При этом различают трубки *ионные и электронные*. В ионных трубках свободные электроны создаются в результате бомбардировки холодного катода положительными ионами, возникающими в разреженном (до 10^{-3} — 10^{-4} мм рт.ст.) газе при приложении к ним высокого напряжения. В электронных же трубках свободные электроны появляются вследствие термоэлектронной эмиссии катода, накаливаемого током.

2. По способу создания и поддержания вакуума. При этом различают трубки *запаянные и разборные*.

В запаянных трубках высокий вакуум создается еще при их изготовлении и сохраняется в течение всего периода эксплуатации благодаря герметичности ее корпуса (баллона). Нарушение вакуума вызывает выход трубки из строя.

В разборных трубках вакуум создается и поддерживается с помощью вакуумного насоса в процессе эксплуатации.

3. По назначению. Трубки применяют *для просвечивания материалов, для структурного анализа и для медицинских целей* (диагностические и терапевтические).

4. По величине (площади) фокуса. Трубки изготавливают *с нормальным* (6—7 мм²) *и острым фокусом* (несколько сотых или тысячных долей миллиметра квадратного).

Основным типом трубок, применяемых в настоящее время для просвечивания и структурного анализа, являются запаянные электронные

трубки (рис. 1), представляющие собой стеклянный баллон, в который введены два электрода: катод — в виде накаливаемой проволочной вольфрамовой спирали и анод — в виде массивной медной трубки.

В баллоне создается высокий вакуум (10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.), обеспечивающий свободное движение электронов от катода к аноду, тепловую и химическую изоляцию катода, а также предотвращающий возникновение газового разряда между электродами.

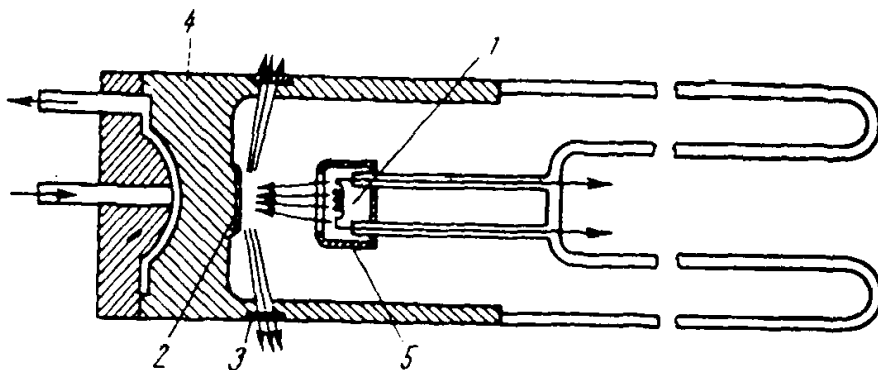


Рис. 1. Схема запаянной электронной рентгеновской трубки БСВ-2 для структурного анализа:

1 — катод; 2 — анод; 3 — окна для выпуска рентгеновских лучей; 4 — защитный цилиндр; 5 — фокусирующий колпачок

Когда вольфрамовая спираль, разогретая током накала до 2100 — 2200°C , испускает электроны, то они, находясь в поле приложенного к полюсам трубки высокого напряжения, устремляются с большой скоростью к аноду. Ударяясь о площадку в торце анода (зеркало анода), электроны резко тормозятся. Примерно 1% их кинетической энергии при этом превращается в энергию электромагнитных колебаний — рентге-

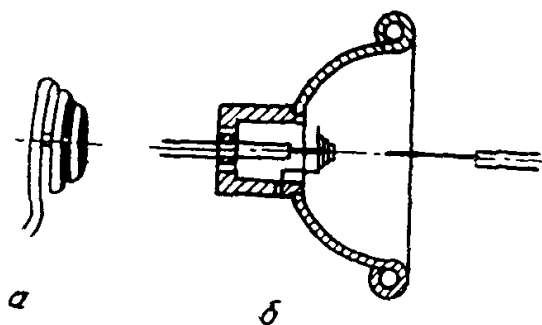


Рис. 2. Устройство катода трубки с круглым фокусом:

а — спираль; б — спираль в фокусирующей чашке

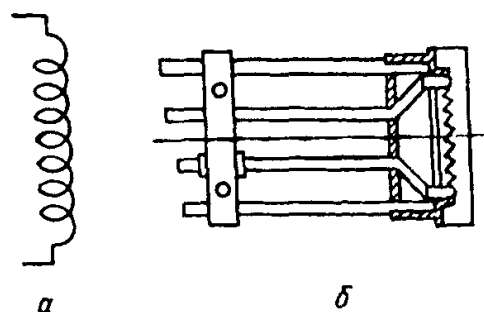


Рис. 3. Устройство катода трубки с линейчатым фокусом:

а — спираль; б — крепление спирали в фокусирующем полуцилиндре

новских лучей; остальная энергия трансформируется в тепло, выделяющееся на аноде.

Относительно мягкие лучи, испускаемые обычно трубками для структурного анализа (с длиной волн 1Å и больше), очень сильно поглощаются стеклом. Поэтому для выпуска рентгеновских лучей в баллоны этих трубок впаивают специальные окна (см. рис. 1, 3), изготовленные либо из сплава гетан, содержащего легкие элементы (бериллий, литий, бор), либо из металлического бериллия.

Катод в электронных трубках представляет собой обычно вольфрамовую спираль, часто покрываемую слоем тория для повышения эмиссионных характеристик. Спираль помещают в так называемый фокуси-

рующей колпачок. Назначение колпачка — сузить пучок электронов, летящих с катода на анод, и уменьшить фокус трубки.

Фокусом трубки называют площадку на аноде, на которую падают электроны и от которой излучаются рентгеновские лучи.

Современные рентгеновские трубки имеют круглый или линейчатый фокус. Соответственно катод выполняют либо в виде спирали, помещенной внутри фокусирующей чашки (рис. 2), либо в виде винтовой линии, находящейся внутри полуцилиндра (рис. 3).

Размеры и форма фокуса могут быть определены экспериментально съемкой фокуса с помощью камеры-обскуры (рис. 4), с толщиной свинцовых стенок 3—5 мм, имеющей тонкое отверстие (меньше фокуса трубки) в передней стенке. В такую камеру помещают на расстоянии B от передней стенки фотопластинку, завернутую в черную бумагу, и, установив аппарат на расстоянии A от фокуса, освещают пластинку с выдержкой 1—2 мин. После проявления на пленке получается яркое пятно — обратное изображение фокуса длиной L . Поперечный размер фокуса определяют по формуле

$$x = L \frac{A}{B}.$$

Кроме размера x , важное значение имеет еще и распределение интенсивности излучения по площади фокуса.

Анод (рис. 5) представляет собой полый массивный цилиндр, изготовленный из материала с высокой теплопроводностью, чаще всего из

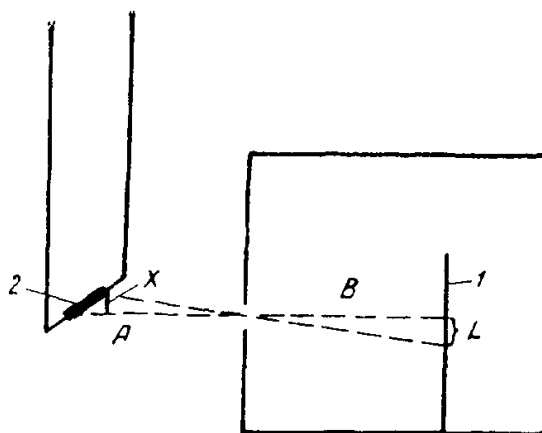


Рис. 4. Определение размера и формы фокуса с помощью камеры-обскуры:

1 — фотопластинка; 2 — фокус

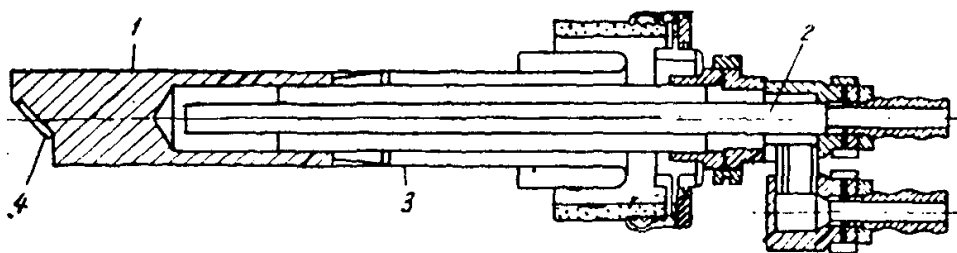


Рис. 5. Устройство анода рентгеновской трубки:

1 — корпус; 2 — вилка охлаждающего устройства; 3 — стеклянная ножка; 4 — зеркало анода

меди. В торцовую стенку анода впрессовывают пластинку — антикатод (зеркало анода), которая тормозит электроны, эмиттированные с катода. В трубках для структурного анализа зеркало анода изготавливают из того металла, излучение которого (характеристическое или сплошное) используют для получения дифракционной картины при решении конкретных задач рентгеноструктурного анализа. Наиболее распространены трубки с анодами из хрома, железа, ванадия, кобальта, никеля, меди, молибдена, вольфрама; трубки изготавливают также с серебряным и марганцевым анодами.

Торец анода в трубках для структурного анализа срезан под углом 90° к оси анода (см. рис. 1).

При ударе электронов о зеркало анода выделяется большое количество тепла. Перегрев анода может вызвать нарушение вакуума, интенсивное распыление и даже расплавление зеркала и самого анода. Во избежание этого анод охлаждают проточной водой или маслом в непрерывно и длительно работающих трубках и водой, заливаемой в специальный бачок, в кратковременно работающих трубках.

Важнейшей характеристикой трубки является ее предельная мощность

$$P = UI \text{ вт,}$$

где U — максимальное высокое напряжение, в;

I — ток трубки, а.

Превышение предельной мощности недопустимо, так как это вызовет перегрев анода.

Уменьшение площади фокуса трубки вызывает уменьшение объема металла, в котором происходит выделение тепла, и требует снижения предельной мощности трубки.

Для трубки БСВ-2 с медным антикатодом допустимая мощность равна 700 вт, а допустимая удельная мощность ¹ 48 вт/мм². Следовательно, нормальная площадь фокуса такой трубки обычно составляет

$$\frac{700}{48} = 14 \div 15 \text{ мм}^2.$$

Учитывая предельную мощность, можно определить также электрический режим работы трубки.

Для указанной площади фокуса при работе на аппарате УРС-55 при максимальном напряжении 45 кВ ток трубки не должен превышать

$$I \leq \frac{P}{U} = \frac{700}{45\,000} \leq 15 \text{ ма.}$$

В некоторых задачах рентгеноструктурного анализа, особенно требующих получения рентгенограмм с высоким разрешением, эффективность съемки зависит от размеров фокуса и, значит, определяется удельной мощностью трубки — мощностью, испускаемой единицей площади антикатада. Для таких условий предназначены острофокусные трубки, например, выпускаемые советской промышленностью трубки БСВ-7, БСВ-8, БСВ-9 и микрофокусная трубка БСВ-5. Удельная мощность лимитируется двумя факторами: 1) термическим — антикатод может, не разрушаясь, выдержать лишь определенную нагрузку; максимальная мощность соответствует температуре на поверхности, которая лишь немного меньше температуры плавления металла антикатада; если фокус круглый, то с достаточной точностью можно считать, что допустимая удельная мощность пропорциональна $1/r_0$, где r_0 — радиус фокуса; 2) электронным — мощность пучка на единицу площади, которую можно сконцентрировать в сечении радиуса r_0 , пропорциональна $I_0 r_0^{3/2}$, где I_0 характеризует эмиссионную способность

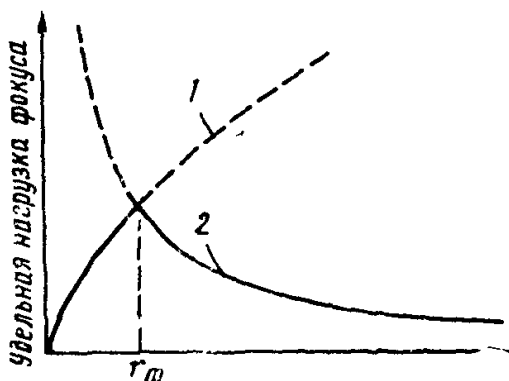


Рис. 6. Зависимость предельной допустимой нагрузки фокуса рентгеновской трубки от его радиуса:

1 — электронный предел; 2 — термический предел

лимитируется двумя факторами: 1) термическим — антикатод может, не разрушаясь, выдержать лишь определенную нагрузку; максимальная мощность соответствует температуре на поверхности, которая лишь немного меньше температуры плавления металла антикатада; если фокус круглый, то с достаточной точностью можно считать, что допустимая удельная мощность пропорциональна $1/r_0$, где r_0 — радиус фокуса; 2) электронным — мощность пучка на единицу площади, которую можно сконцентрировать в сечении радиуса r_0 , пропорциональна $I_0 r_0^{3/2}$, где I_0 характеризует эмиссионную способность

¹ Удельная мощность острофокусных трубок может достигать 10 кВт/мм², так как чем меньше фокус, тем лучше теплоотвод и тем большие перегрузки можно допускать.

нити накала катода; I_0 лимитируется той температурой, которую нить накала может выдержать без разрушения продолжительное время. На рис. 6 приведена зависимость удельной нагрузки от размеров фокуса и определяемый электронным и термическим пределами оптимальный размер r_m .

Фокусировку пучка электронов в острофокусных трубках производят с помощью электронных линз (изменением тока смещения), создающих на антикатоде сильно уменьшенное изображение нити накала катода. Настройка трубки состоит в определении зависимости между током смещения и размером фокуса. При изменении тока смещения изменяется удельная мощность трубки, о которой можно судить по величине максимального тока через трубку при постоянном напряжении. Если необходимый для решения конкретной задачи размер фокуса меньше оптимального, используемая удельная мощность должна быть меньше допустимой, а экспозиции должны быть соответственно больше.

Под электрическими характеристиками рентгеновских трубок понимают следующие две основные зависимости:

$$1) I_T = f(I_H) \text{ при } U_A = \text{const};$$

$$2) I_T = f(U_A) \text{ при } I_H = \text{const},$$

где I_T — ток в трубке, образующийся за счет перехода электронов с катода на анод (так называемый анодный ток), *ма*;
 I_H — ток накала во вторичной обмотке трансформатора накала, разогревающий катодную нить, *а*;
 U_A — высокое напряжение, приложенное к полюсам трубки (так называемое анодное напряжение), *кв*.

Графическое изображение этих зависимостей показано на рис. 7. Из рис. 7, *а* следует, что измеряемый ток в трубке появляется лишь после достижения тока накала определенного значения, т. е. начиная с определенной температуры нагрева катода, примерно равной $2000\text{—}2100^\circ\text{C}$. При более низких температурах нагрева электронная эмиссия практически не наблюдается.

Нагрев катодной нити выше 2100°C резко повышает количество электронов, испускаемых в единицу времени (эмиссионный ток).

График, подобный показанному на рис. 7, *а*, строят при постоянном напряжении, обеспечивающем во всем диапазоне значений I_H получение режима насыщения.

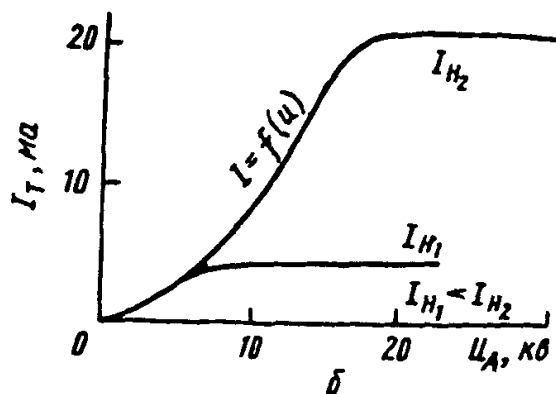
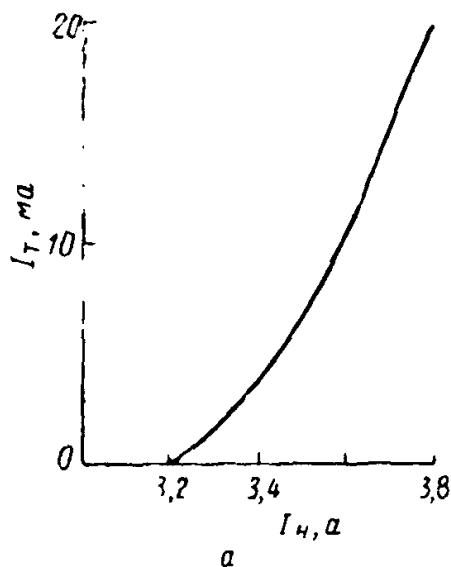


Рис. 7. Зависимость силы тока в трубке I_T от силы тока накала I_H при неизменном напряжении (*а*) и от напряжения при неизменном токе накала (*б*)

Из рис. 7, б следует, что при данном токе накала I_n и при низких напряжениях не все электроны эмиссии попадают на анод, а лишь часть их, причем тем меньшая, чем ниже напряжение. Начиная с определенного напряжения U_A все электроны эмиссии попадают на анод. Дальнейшее увеличение напряжения не может вызывать увеличения тока в трубке при данном токе накала — через трубку проходит ток насыщения. Чтобы увеличить силу тока в трубке, необходимо повысить силу тока накала. Таким образом, чем выше сила тока накала, тем выше сила тока насыщения.

Рентгеновские трубки работают всегда на режиме насыщения при напряжениях, в три-четыре раза превышающих минимальное напряжение, необходимое для установления тока насыщения.

Знание характеристики трубки позволяет заранее установить ток накала, исходя из необходимого тока в трубке, а также то минимальное напряжение, ниже которого режим работы трубки не будет устойчивым.

Характеристика трубок для структурного анализа, выпускаемых советской промышленностью, приведена в таблице. Условное обозначение состоит из шести символов; например 0,12 БСВ-4 Си означает, что трубка имеет мощность 0,12 кв, безопасна (в защитном кожухе), предназначена для структурного анализа и имеет водяное охлаждение; номер модели — 4, антикатод — медный.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОК ДЛЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА*1

Тип трубки	Количество окон для выпуска рентгеновых лучей	Максимальная допустимая мощность для трубок, <i>вт</i>	Форма фокуса	Размеры фокуса, <i>мм</i>	Размеры пресекции фокуса, <i>мм</i>	Удельная нагрузка на единицу площади проекции фокуса	Интегральная интенсивность $\times 10^8$	Напряжение на аноде трубки с медным анодом, <i>кв</i>	Максимальный анодный ток, <i>ма</i>
БСВ-2	2	700	Линейная	1,2×12	1,2×1,2	48	327		
БСВ-3	2	450	»	7×2,5	—	22		45	14
БСВ-4	4	120	Круглая	3	3×0,3*3	17	88		
БСВ-5*2	2	20	»	0,040	0,04×0,004*3	4000			
БСВ-6	2	450	Линейная	25×5	2,5×0,5	36	304	45	14
БСВ-7									
БСВ-8	2	1000	»	1×12	1×1,2	83	454	50	40
	1				0,1×12				
БСВ-9	2	1500	»	2×12	2×1,2	63	170	50	60
	1				0,2×12				
БСВ-10	2	600	»	0,4×8	0,4×0,8	~1900		45	24
	1				0,04×8				

*1 Уманский М. М. и др. Кристаллография, 1963, т. 8, № 2, с. 300.

Хейкер Д. М., Зевин Л. С. Рентгеновская дифрактометрия. Физматгиз, 1963.

*2 Охлаждение масляное.

*3 Эллипс.

РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ

С помощью рентгеновского аппарата обеспечивают:

1. Питание рентгеновской трубки электрической энергией с малой силой тока (до нескольких десятков миллиампер) и с высоким напря-

жением, которые можно регулировать. В некоторых установках предусмотрено выпрямление анодного тока.

2. Питание катодных нитей электронной трубки и выпрямляющих ламп-кенотронов регулируемым током накала в 3—6 а при низком напряжении.

Аппараты для структурного анализа изготавливают обычно на напряжение не более 60 кв.

Рентгеновские аппараты для структурного анализа, предназначенные для работы фотометодом

Принципиальная схема полуволнового аппарата с одним кенотроном показана на рис. 8.

Основными частями его являются следующие.

Высоковольтный трансформатор (PP—SS) служит для получения высокого напряжения. Первичная обмотка питается от автотрансформатора AA или от вариатора напряжения с плавным изменением напряжения.

Ступенчатый автотрансформатор (AA) применяют для регулирования высокого напряжения изменением напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Трансформаторы накала (T_{np} и $T_{нк}$) используют для питания нитей накала рентгеновской трубки и кенотрона. Для нагрева катодных вольфрамовых нитей до температуры, превышающей 2100°C , через них пропускают ток в 3—6 а. Этот ток подают от трансформаторов накала, понижающих напряжение до 6—8 в для питания рентгеновской трубки и до 10—15 в для питания кенотрона.

Реостаты накала ($R_{нк}$, R_{np}) служат для регулирования силы тока накала катода трубки и кенотрона.

Так как небольшие колебания в напряжении городской сети приводят к колебаниям тока накала, которые сильно изменяют анодный ток трубки, для стабилизации тока накала применяют стабилизатор накала.

Кенотрон (К) служит в качестве выпрямителя и отключает рентгеновскую трубку при перемене знака напряжения. Кенотрон необходим при работе с ионными трубками. При работе с электронными трубками он может отсутствовать, так как всякая электронная трубка сама яв-

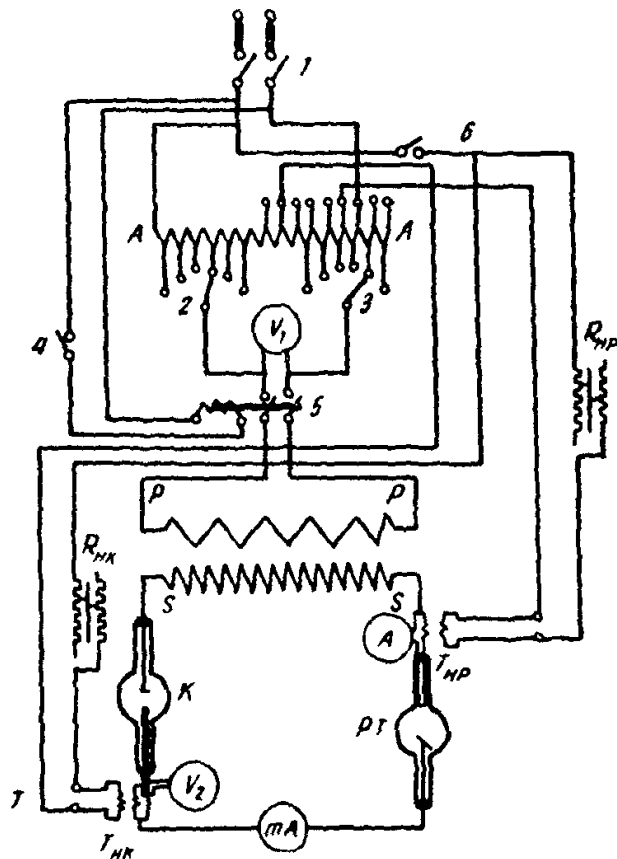


Рис. 8. Схема однокатодного рентгеновского аппарата:

PT — рентгеновская трубка; AA — автотрансформатор; PP—SS — высоковольтный трансформатор; R_{np} и $R_{нк}$ — реостаты накала рентгеновской трубки и кенотрона; 1 — рубильник городской сети; 2, 3 — ручки для грубой и тонкой регулировки высокого напряжения; 4 — кнопочный выключатель высокого напряжения; 5 — электромагнитный рубильник; 6 — выключатель тока накала катода трубки и кенотрона