

Г. 82

18

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ИЯФ 28-71

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова, В.М.Горчуков

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КЕНОТРОН КАК ИСТОЧНИК
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

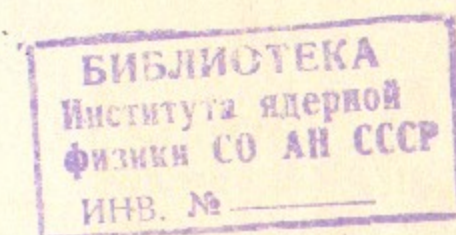
Новосибирск

1971

Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова, В.М.Горчуков

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КЕНОТРОН КАК ИСТОЧНИК
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Новосибирск

1971

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова, В.М.Горчуков

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КЕНОТРОН КАК ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приведены данные по экспериментальному исследованию количественного выхода и спектрально-углового распределения рентгеновского излучения наиболее распространенных отечественных высоковольтных кенотронов в различных режимах работы. Анализ электрических схем питания аппаратуры, приведенный в работе, рекомендации по эксплуатации высоковольтных кенотронов и защите помогут выбрать наиболее радиационно-безопасный вариант выпрямительного устройства.

Работа высоковольтных кенотронов даже в нормальном режиме (напряжения и ток накала катодов соответствуют паспортным данным, падение напряжения на аноде не превышает 100 В, но в некоторых случаях может достигать 1000 В) связана с генерацией рентгеновского излучения. При положительном полупериоде анод-катода электроны, летящие на анод и отдавая ему свою энергию, значительно (до 10%) рассеивают его. При отрицатель-

О г л а в л е н и е

	стр.
§ 1. Экспериментальная установка	4
§ 2. Режим недокала катода кенотрона	8
§ 3. Спектрально-угловое распределение интенсивностей рентгеновского излучения в режиме недокала катодов кенотронов	28
§ 4. Работа кенотрона с давлением газа в баллоне более 10^{-6} мм рт.ст.	44
§ 5. Короткое замыкание нагрузки выпрямителя	49
§ 6. Анализ электрических схем и рекомендации по эксплуатации высоковольтных выпрямителей	53
Литература	57

Кенотроны являются наиболее распространенными электровакуумными приборами. Они находят широкое применение в различной радиотехнической, радиоэлектронной аппаратуре, в приборах и установках для научных исследований, народном хозяйстве и в быту в качестве выпрямительных элементов для получения постоянного тока. Кенотроны могут выполнять и ряд других сугубо специфических задач. Радиационная опасность высоковольтных кенотронов зависит не только от качества изготовления и конструкции самих ламп, но и от ряда особенностей применения их в различных схемах включения. Конструктивные виды кенотронов представлены на рис.1,2.

Кенотрон представляет собой двухэлектродный вакуумный прибор, состоящий из катода-источника электронов и анода-приёмника электронов. Электроды помещаются в стеклянный баллон, в котором создается вакуум порядка 10^{-6} - 10^{-7} мм рт.ст. Аноды кенотронов обычно изготавливают из молибдена, тантала или вольфрама. Конструктивно их выполняют в виде дисков или цилиндров. Но встречаются аноды и другой формы. Аноды кенотронов, работающих при напряжении до 25 кв могут изготавливаться из зачерненного никеля или алюминированного железа. В кенотронах используются термоэмиссионные катоды прямого или косвенного накала. Конструктивные особенности каждого из них зависят от типа и назначения. Катоды могут быть из чистого вольфрама (металлические) или вольфрамовой проволоки с присадкой тория или рения, которая подвергается карбидированию (металлоплёночные). Вольфрамовые торированные или ренированные карбидированные катоды обладают лучшими эмиссионными свойствами, чем катоды, изготовленные из чистого вольфрама. Еще большей эмиссией обладают оксидные катоды, представляющие собой никелевый цилиндр, покрытый окислами щелочно-земельных металлов бария, стронция или кальция, внутри которого помещается подогреватель. Толщина стенок баллонов кенотронов различных марок заключена в интервале 80-480 мг/см².

Работа высоковольтных кенотронов даже в нормальном режиме* (напряжение и ток накала соответствуют паспортным данным, падение напряжения на промежутке катод-анод равно нескольким сотням вольт) связана с генерацией рентгеновского излучения. При положительном полупериоде электроны, испускаемые катодом, летят на анод и, отдавая ему свою энергию, незначительно (сотни градусов) разогревают его. При отрицатель-

ном полупериоде, протекающий через лампу обратный ток электронов при торможении в материале катода генерирует рентгеновское излучение. Величина мощности дозы и энергия излучения различных кенотронов зависит при этом от величин обратного тока и обратного напряжения. В ряде случаев падение напряжения на промежутке катод-анод может быть значительным и при положительном полупериоде в этом случае возникает рентгеновское излучение большой интенсивности. Целью настоящей работы является рассмотрение таких режимов работы кенотронов, при которых образуется рентгеновское излучение большой интенсивности.

Для исследования электрических параметров работы кенотронов и связанной с ними радиационной обстановки была создана экспериментальная установка. В ходе экспериментов выяснялись зависимости и связи между количественным выходом и качественным составом рентгеновского излучения, генерируемого высоковольтными кенотронами и их режимами работы.

§ 1. Экспериментальная установка

Установка для экспериментов с кенотронами состояла из: высоковольтного трансформатора с номинальной мощностью 3 квт и амплитудным напряжением до 100 кв, сопротивления нагрузки в 1,8 мом (80 сопротивлений ПЭВ номиналами от 20 до 33 ком с мощностью рассеяния 100 вт каждое), измерителя высокого напряжения (вольтметр С-100). Для измерения прямого и обратного токов использовались миллиамперметр М-108 с пределом 2-200 ма класса точности 0,5 и микроамперметр М 265М с пределами 0-500 мка класса точности 1,0, включенные в цепь прямого и обратного тока через выпрямительные столбики типа Д1008 по 5 штук. Первичная цепь высоковольтного трансформатора запитывалась через автотрансформатор мощностью 5 квт, цепь накала запитывалась через феррорезонансный стабилизатор или без него. Для измерения напряжений накала кенотрона и питания высоковольтного трансформатора использовались приборы С-50 класса точности 1,0 и Э59 класса точности 0,5. Форма импульса и амплитуда тока, проходящего через кенотрон, определялись по осциллографу С-1-8. Электрическая схема установки приведена на рис.3.

Измерение мощностей доз рентгеновского излучения высоковольтных кенотронов осуществлялось нормальной ионизационной камерой, изготовленной в Службе радиационной безопасности.

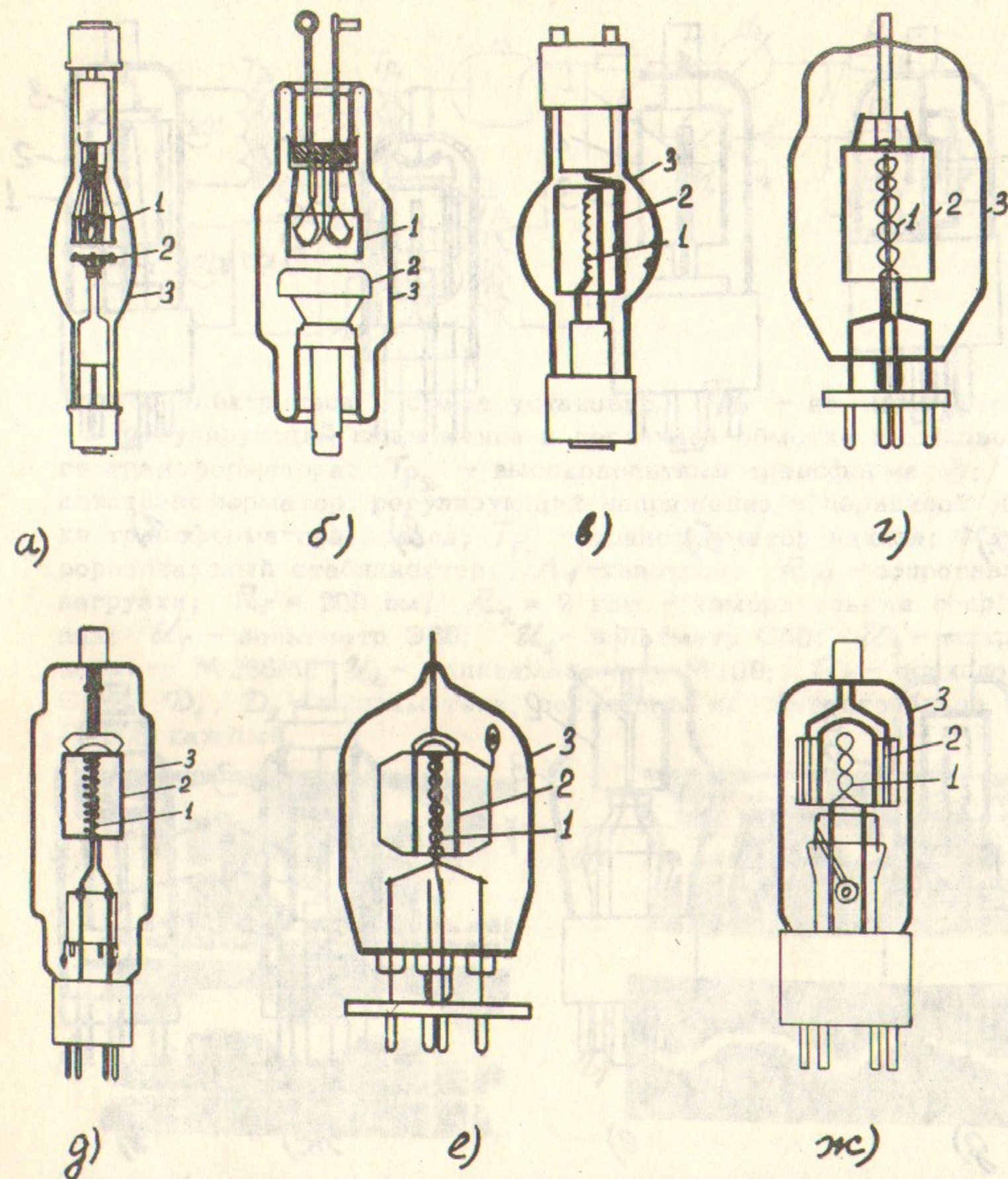
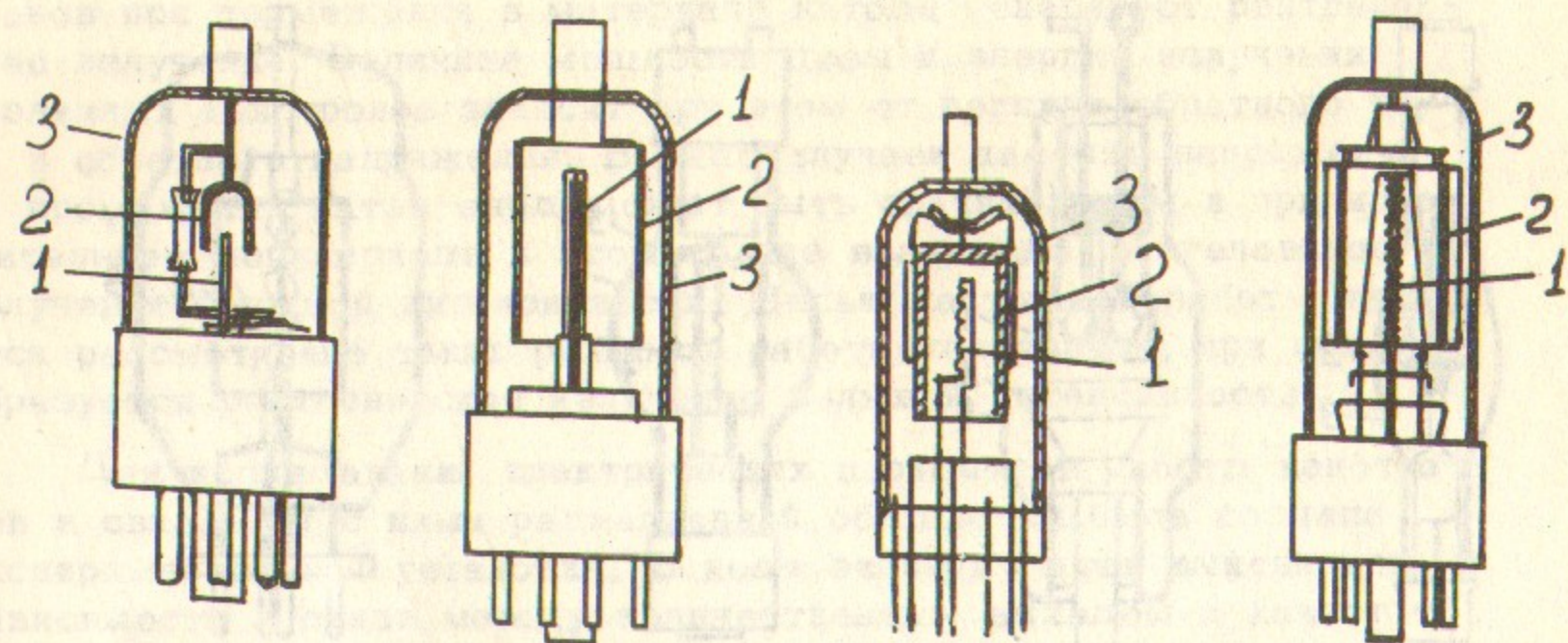


Рис.1. Конструктивный вид кенотронов: а) КРМ-150; б) КРМ-80; в) КРМ-110; г) В1-0,15/55; д) В1-0,1/40; е) В1-0,1/30; ж) В1-0,02/20; 1 - нить накала и катод; 2 - анод; 3 - баллон.

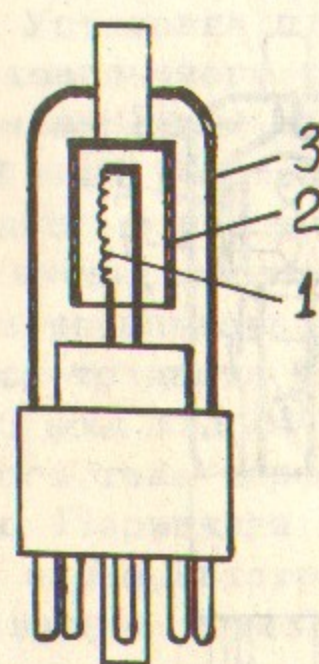


а)

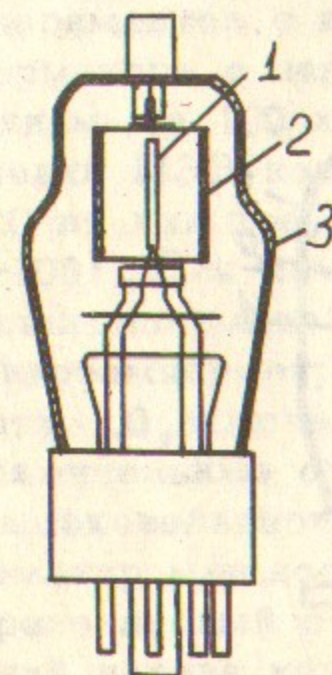
б)

в)

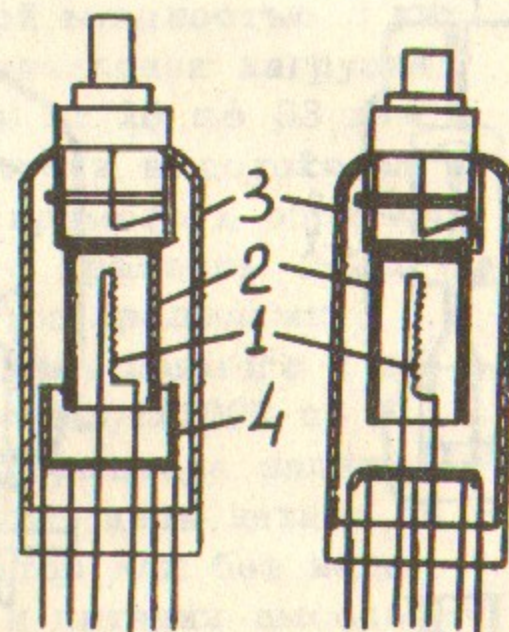
з)



г)



е)



ж)

з)

Рис.2. Конструктивный вид кенотронов: а) 1Ц1С; б) 3Ц16С; в) 1Ц11П и 3Ц18П; г) В1-0,03/13; д) 1Ц7С; е) 2Ц2С; ж) 1Ц21П-К; з) 1Ц21П; 1 - нить накала и катод; 2 - анод; 3 - баллон.

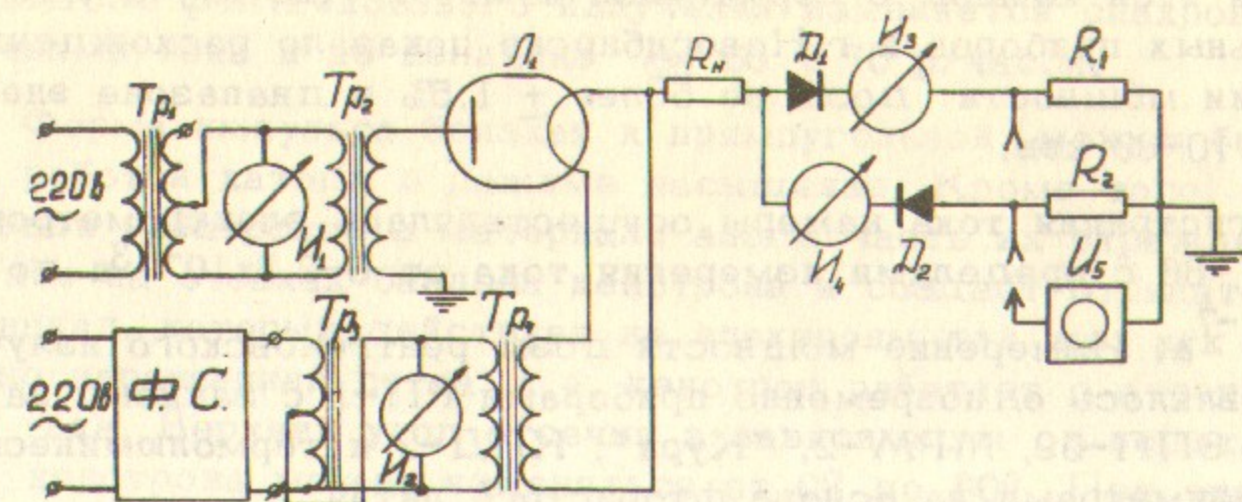


Рис.3. Электрическая схема установки. Tr_1 - автотрансформатор, регулирующий напряжение в первичной обмотке высоковольтного трансформатора; Tr_2 - высоковольтный трансформатор; Tr_3 - автотрансформатор, регулирующий напряжение в первичной обмотке трансформатора накала; Tr_4 - трансформатор накала; ФС - феррорезонансный стабилизатор; L_1 - кенотрон; R_n - сопротивление нагрузки; $R_1 = 200$ ом; $R_2 = 2$ ком - измерительные сопротивления; U_1 - вольтметр Э59; U_2 - вольтметр С50; U_3 - микроамперметр М265М; U_4 - миллиамперметр М109; U_5 - осциллограф С1-8; D_1, D_2 - выпрямители, состоящие из пяти столбиков типа Д1008 каждый.

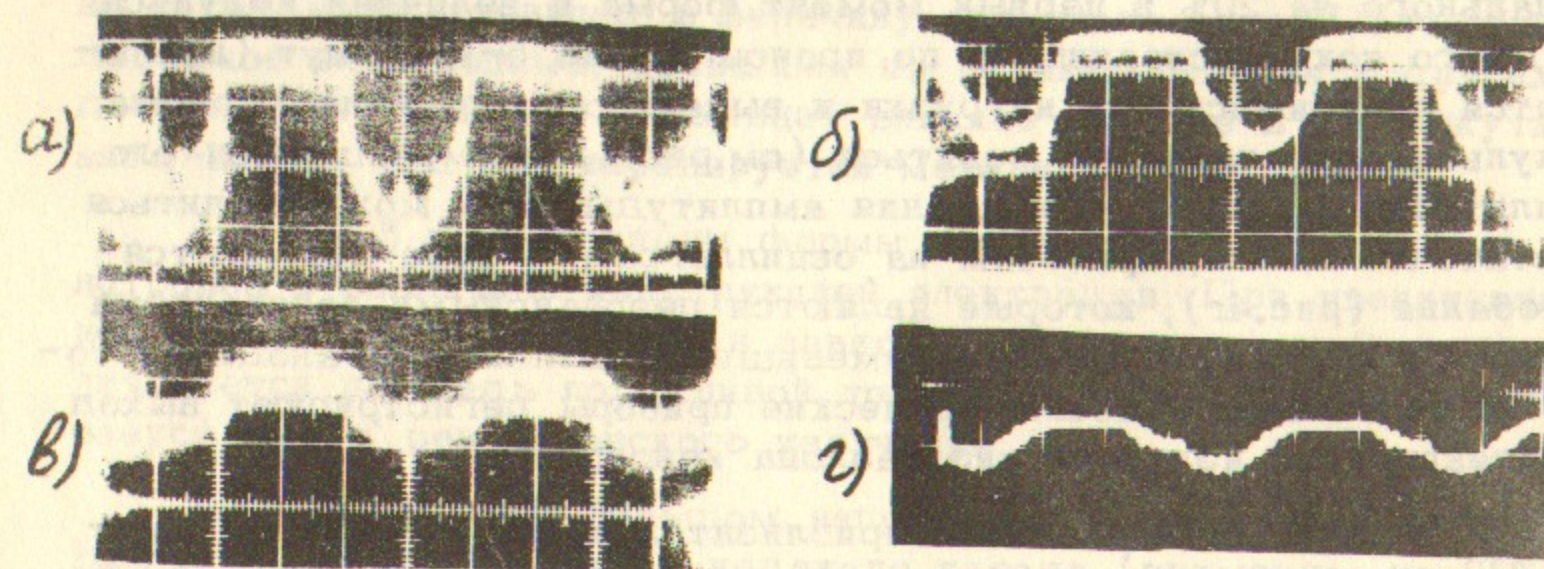


Рис.4. Измерение формы импульса анодного тока кенотрона типа КРМ80 от напряжения канала катода. Напряжение накала: а) 5,2 в; б) 4,7 в; г) 3,5 в. Амплитуда анодного тока: а) 25 ма; б) 15 ма; в) 7 ма; г) 2,5 ма.

Сличение этой камеры с нормальной камерой Института мер и измерительных приборов в г.Новосибирске показало расхождение при измерении мощности дозы не более $\pm 1,5\%$ в диапазоне энергий квантов 10-60 кэв.

Регистрация тока камеры осуществлялась электрометром марки ИМТ-66 с пределами измерения тока от $0-2,5 \times 10^{-13}$ а до $0-2,5 \times 10^{-7}$ а. Измерение мощности дозы рентгеновского излучения осуществлялось одновременно приборами РП-1 с записью на самописце ЭПП-09, МРМ-2, "Кура", КИД-2 и термолюминесцентными дозиметрами на основе фтористого лития.

§ 2. Режим недокала катода кенотрона

а) Исследовалось падение напряжения на кенотронах в зависимости от величины напряжения накала катода и выход рентгеновского излучения у группы, состоящей из 10-15 экземпляров приборов одного типа. Установлено, что при уменьшении напряжения накала катода увеличивается падение напряжения на кенотроне. Форма импульса тока, проходящего через кенотрон, при этом начинает меняться. Для новых кенотронов с вольфрамовыми, торированными карбидированными катодами и конструкцией электродов, представленных на рис.1а-ж, при уменьшении накала от номинального на 20% в первый момент форма и величина импульса анодного тока постоянны, а по прошествии 5-10 минут (наблюдается зависимость от нагрузки и высокого напряжения) форма импульса тока начинает меняться (см.рис.4) и уменьшается его амплитуда. Процесс уменьшения амплитуды тока может длиться достаточно долго, при этом на осциллограмме тока появляются колебания (рис.4г), которые являются резонансными колебаниями системы. Начиная с момента уменьшения амплитуды анодного тока, вышеуказанные дозиметрические приборы регистрируют выход рентгеновского излучения из баллона кенотрона.

При уменьшении накала приблизительно на 30% форма импульса анодного тока приближается к прямоугольной для кенотронов, представленных на рис.1а,б. Амплитуда тока совершает при этом колебания с частотой 0,5-0,8 герца около среднего значения. Амплитуда колебаний прямого тока при 60 кВ высокого напряжения, накале 9,4 в, нагрузке 1,8 мом для кенотрона типа КРМ-150 может достигнуть ± 4 ма при среднем значении тока 18 ма. Мощ-

ность дозы рентгеновского излучения изменяется синхронно с колебаниями тока и по величине $\approx 60 \pm 70$ р/час.м.

Форма импульса, близкая к прямоугольной, может быть объяснена работой катода в режиме насыщения. Кроме того, при торможении электронов в материале анода часть их отражается и оседает на стенках баллона кенотрона и создаёт отрицательный потенциал, который действует на электроны так же, как отрицательно заряженная сетка, т.е. кенотрон работает с отсечкой анодного тока. Верхний угол отсечки в зависимости от недокала катода кенотрона может изменяться от 0° до 90° . При этом, на кенотроне падает большая часть приложенного высокого напряжения и он генерирует более жесткое рентгеновское излучение.

Для кенотронов с конструкцией электродов, представленных на рис. 1 в-ж, с торированными карбидированными катодами в режиме недокала катода не наблюдалось влияния отрицательного электрического поля при работе кенотрона, которое повышает жесткость рентгеновского излучения. Отсутствие этого эффекта объясняется конструкцией электродов. Отраженные от анода электроны попадают либо на катод, либо на другую часть анода. Часть их может выйти за пределы пространства, ограниченного анодом. При обратном полупериоде под действием положительного поля катода электроны, осевшие на стенках баллона, полетят на катод и дадут вклад в величину обратного тока. Поле, создаваемое электронами, осевшими на стенках баллона и других деталях кенотрона, не оказывает влияния на поле в промежутке анод-катод, т.к. оно экранируется металлическим анодом.

На рис.5 представлены формы импульсов обратного тока кенотронов с различной конструкцией электродов. При увеличении недокала катода кенотрона в зависимости от его конструкции увеличивается площадь под кривой тока и, следовательно, увеличивается выход рентгеновского излучения.

При достаточно большом напряжении и токе (для кенотрона КРМ-150-60 кВ, 25 ма) и недокале катода (примерно, на 25% для нового кенотрона) анод кенотрона, разогреваясь электронами, достигает такой температуры, что начинает эмитировать электроны. Электроны анода, разогревая катод, уменьшают недокал. В результате этого уменьшается падение напряжения на промежутке катод-анод и разогревание анода, что ведет к уменьшению обратного тока и катод охлаждается. Увеличивается недокал и т.д.

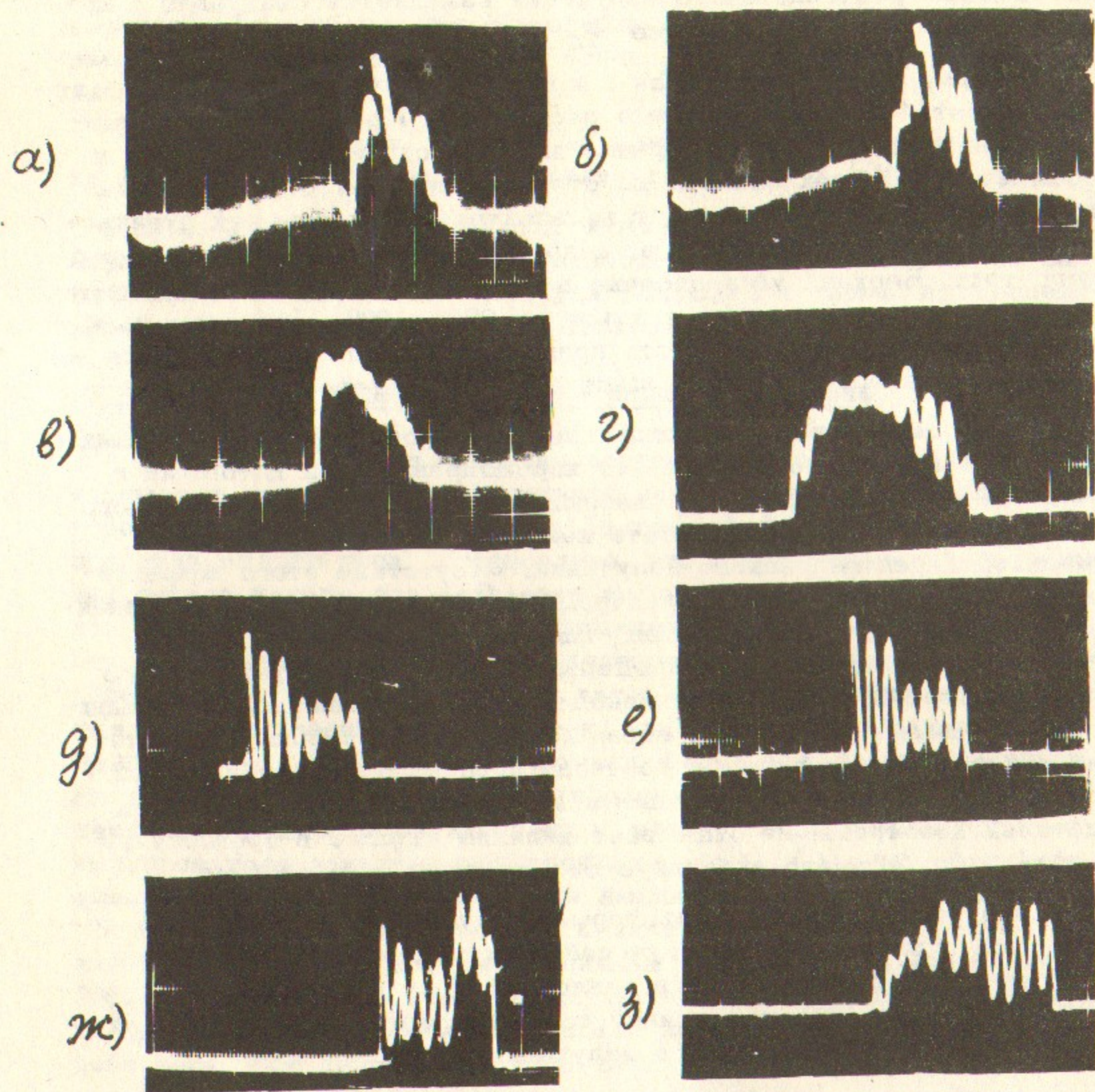


Рис.5. Изменение формы импульса обратного тока кенотронов в зависимости от напряжения накала катода.

КРМ-80: а) 6,1 в; б) 5,8 в; в) 4,5 в; г) 3,5 в;
 В1-0,15/55: д) 6 в; е) 5,4 в; ж) 4,8 в; з) 3,6 в.
 Амплитуда обратного тока: а), б) 140 мка; в), г) 120 мка;
 д), е) 135 мка; ж) 165 мка; з) 110 мка.

Для кенотронов марки КРМ-150 при указанных режимах, через 3-5 минут после включения резко возрастает амплитуда обратного тока от 150 мка до 5 ма и начинаются колебания прямого и обратного тока с частотой 1,5 гц. Амплитуда обратного тока изменяется от 1 до 6 ма, прямого от 25 до 32 ма. В этом случае кенотрон генерирует рентгеновское излучение как за счёт прямого, так и за счёт обратного тока. Мощность дозы рентгеновского излучения возрастает в этом режиме приблизительно на 40% за счёт торможения на катоде электронов, вышедших из анода. Процесс колебаний наблюдался в течение 10 минут, затем установку выключили. Этот режим повторялся десять раз с одним и тем же кенотроном (условия более жесткие встречающихся на практике). После таких испытаний прибор не утратил работоспособности, но напряжение накала, при котором наблюдается максимум излучения, при этом передвинулось в сторону меньших недокалов.

Установлено, что в режиме недокала при питании накала катода без стабилизатора напряжения рентгеновское излучение начинает регистрироваться приборами при напряжении накала катода приблизительно на 10% большем, чем со стабилизатором. При уменьшении напряжения накала на 15-20% от номинального наступает резкий скачок в выходе рентгеновского излучения, вследствие колебаний напряжения в сети. Если цепь накала запитана через стабилизатор (см.рис.3), то при уменьшении напряжения накала выход излучения нарастает плавно.

б) Исследование работы кенотронов в различных режимах недокала катода показало, что кенотроны с металлическими и металлопленочными катодами могут генерировать рентгеновское излучение большой интенсивности. Угловое распределение интенсивностей рентгеновского излучения высоковольтного кенотрона зависит от конструкции электродов, толщины баллона и внешнего оформления лампы.

У отечественных кенотронов рентгеновское излучение начинает регистрироваться приборами при падении напряжения на лампе 10-20 кв. Так, для кенотрона типа КРМ-150 при 50 кв высокого напряжения, анодном токе - 21 ма, падение напряжения на лампе 12 кв, мощность дозы рентгеновского излучения на расстоянии 1 метра равна 16 мр/час.

Изучено угловое распределение излучения наиболее распространенных типов ламп. Отсчет углов производился следующим об -

разом: центр отсчёта брался на середине расстояния между вводами катода и анода, отсчёт углов велся по ходу часовой стрелки, направление оси отсчёта — от вывода катода к выводу анода.

На рис. 6-16 представлены мощности доз в р/час на расстоянии метра от кенотрона в зависимости от напряжения накала катода кенотрона, высокого напряжения и угла, под которым регистрировалось излучение. Эти графики получены усреднением данных по нескольким кенотронам до эксперимента не бывшими в эксплуатации. Относительная ошибка по оси мощностей доз не более $\pm 10\%$.

У кенотронов, представленных на рис. 1 а-в и 2 б, д, е, з, наблюдается симметрия в распределении интенсивностей рентгеновского излучения в плоскостях, проходящих перпендикулярно оси отсчёта. У кенотронов, представленных на рис. 1 г-ж и 2 в, г, симметрии не наблюдается приблизительно в интервале углов (95° , 140°).

Асимметрия объясняется конструкцией анодов ламп данных типов.

в) Выход рентгеновского излучения кенотронов с металлплёночными катодами зависит от падения напряжения на кенотроне в степени приблизительно от 4 до 8 (нормировка на 1 ма анодного тока). Так для кенотронов типа КРМ-150, КРМ-80 выход рентгеновского излучения зависит от напряжения приблизительно в степени от 4 до 5, а у кенотронов с цилиндрической конструкцией анода в степени от 5 до 8. Мощность дозы фильтрованного излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом в зависимости от толщины алюминиевого фильтра пропорциональна напряжению в степени от 4 до 5 [1]. Такая зависимость существует при напряжениях не более 40 кв. При больших напряжениях показатель степени начинает уменьшаться. Расхождение в выходе рентгеновского излучения рентгеновских трубок и высоковольтных кенотронов объясняется различной фильтрацией излучений и различными атомными номерами анодов. Так как с увеличением энергии квантов уменьшается их поглощение стенками колбы, то с увеличением напряжения можно ожидать уменьшения показателя степени. Это предположение подтвердилось экспериментально. Выход рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-150 в диапазоне напряжений 14-20 кв пропорционален напряжению в степени приблизительно 5,2, а в диапазоне 20-27 кв — 4,8.

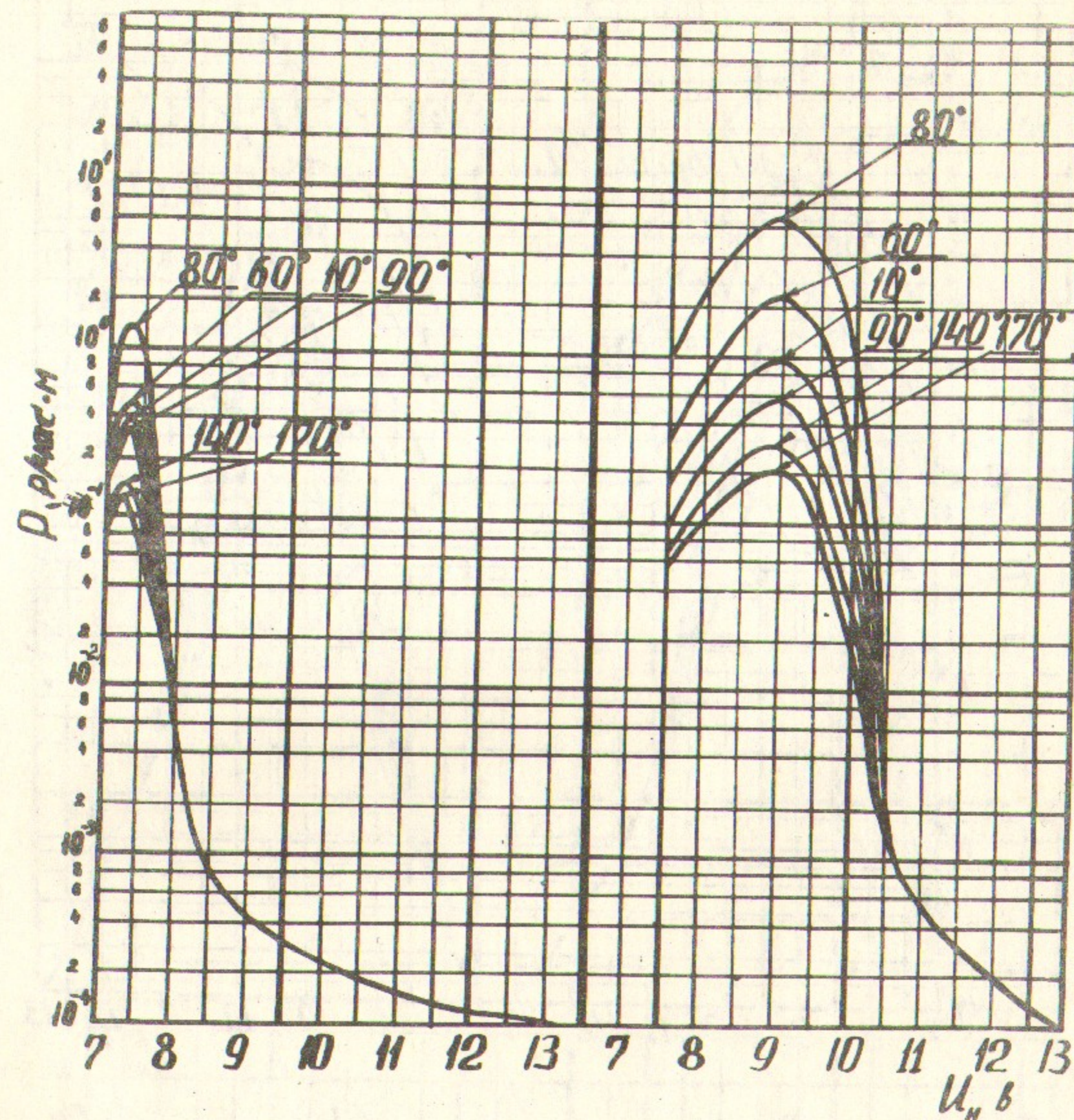
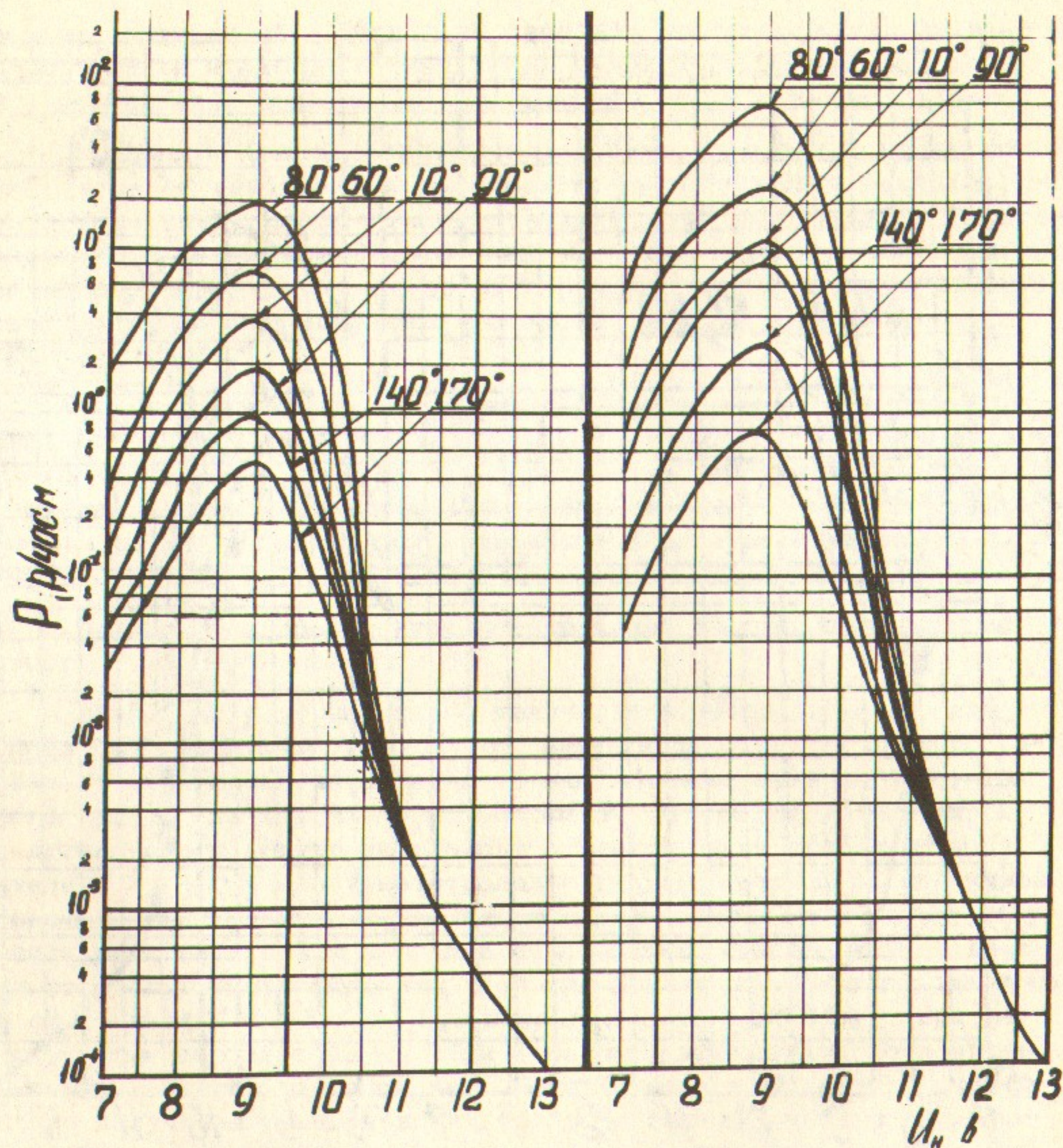


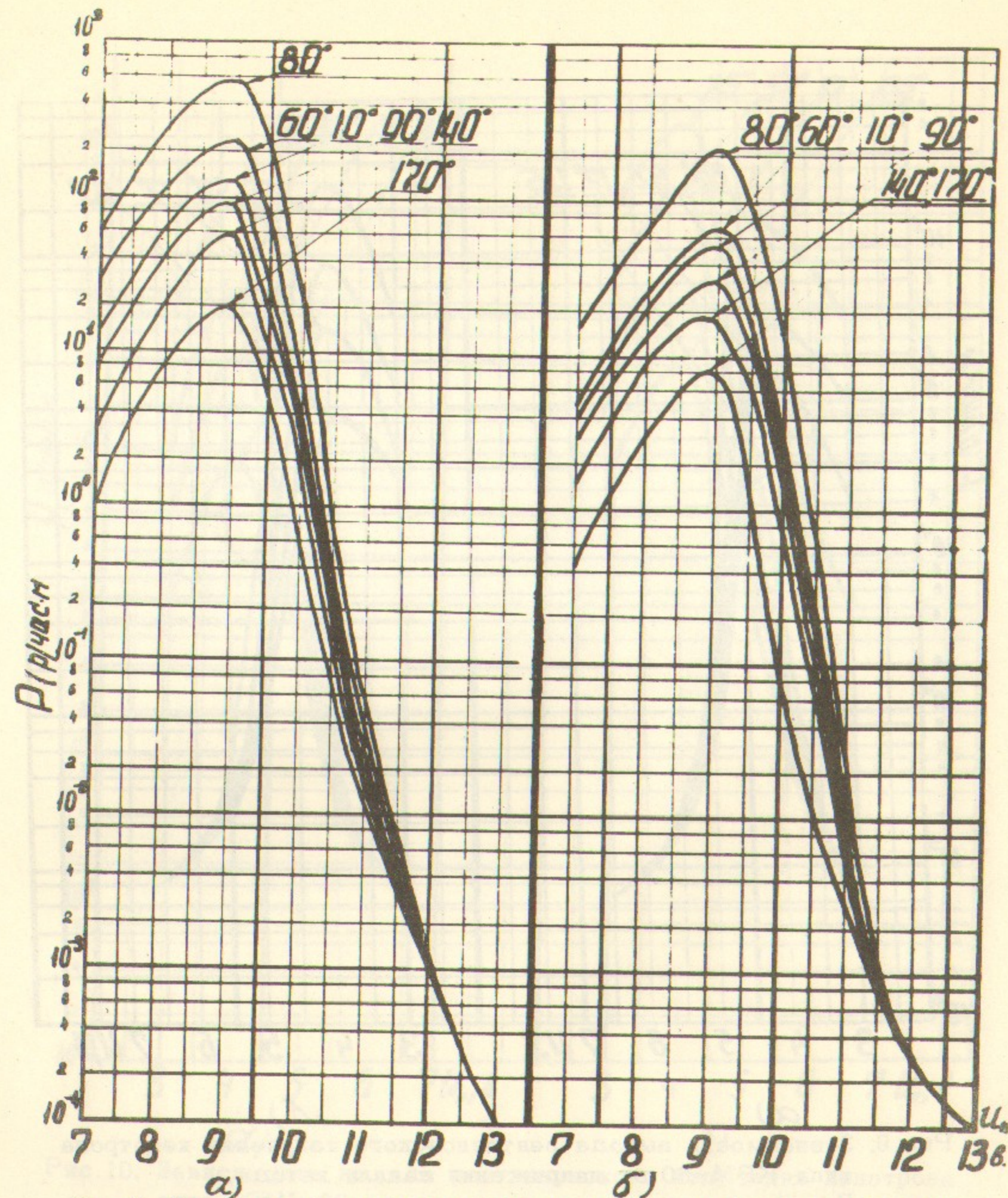
Рис. 6. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-150 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) — 16 кв, б) — 20 кв. Сопротивление нагрузки — 1,8 мом.



а)

б)

Рис.7. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-150 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - 40 кв, б) - 50 кв. Сопротивление нагрузки - 1,8 мом.



а)

б)

Рис.8. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-150 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - 70 кв, б) - 60 кв. Сопротивление нагрузки - 1,8 мом.

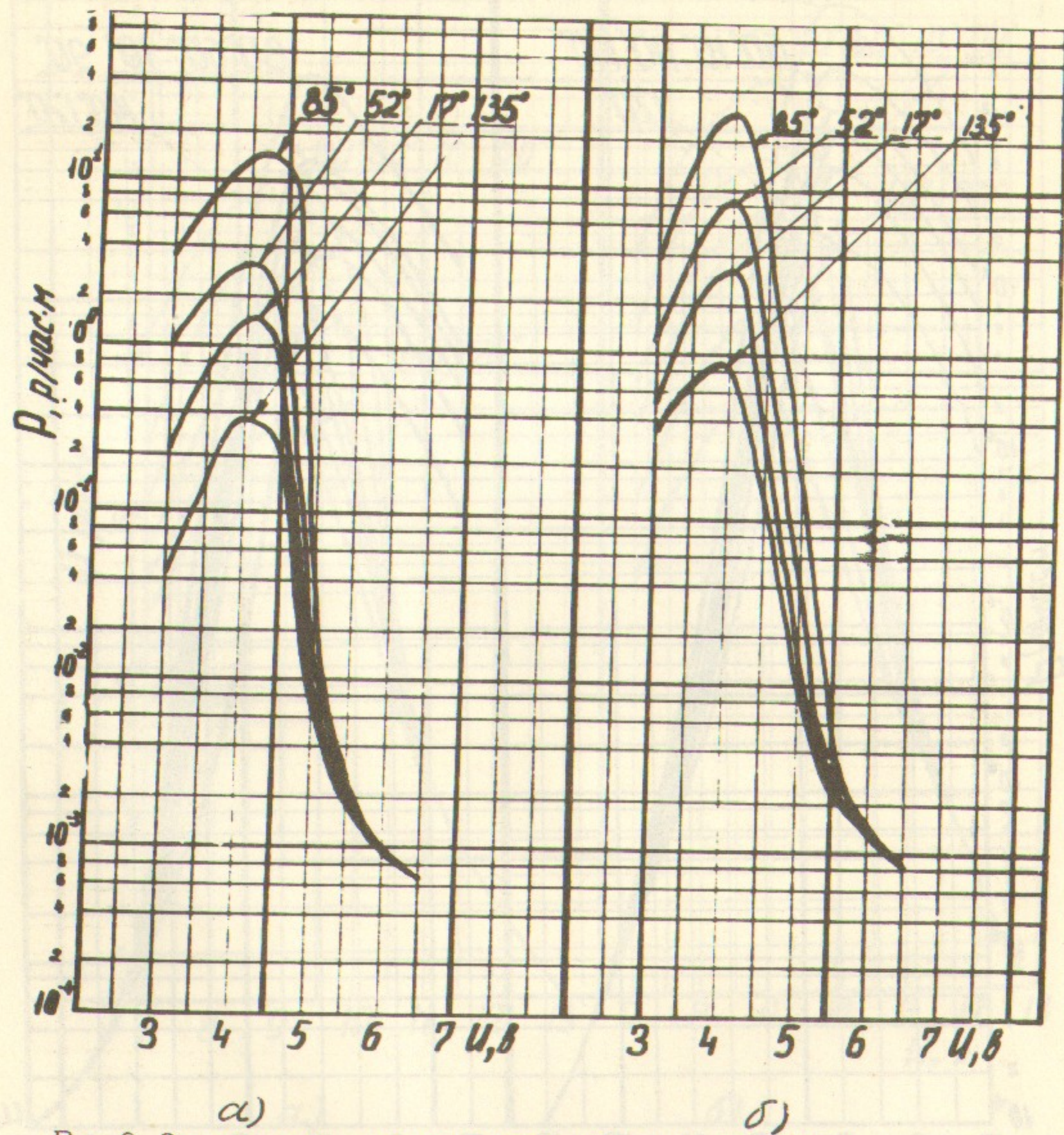


Рис. 9. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-80 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства.
 а) - 40 кв, б) - 45 кв.
 Сопротивление нагрузки - 1,8 мом.

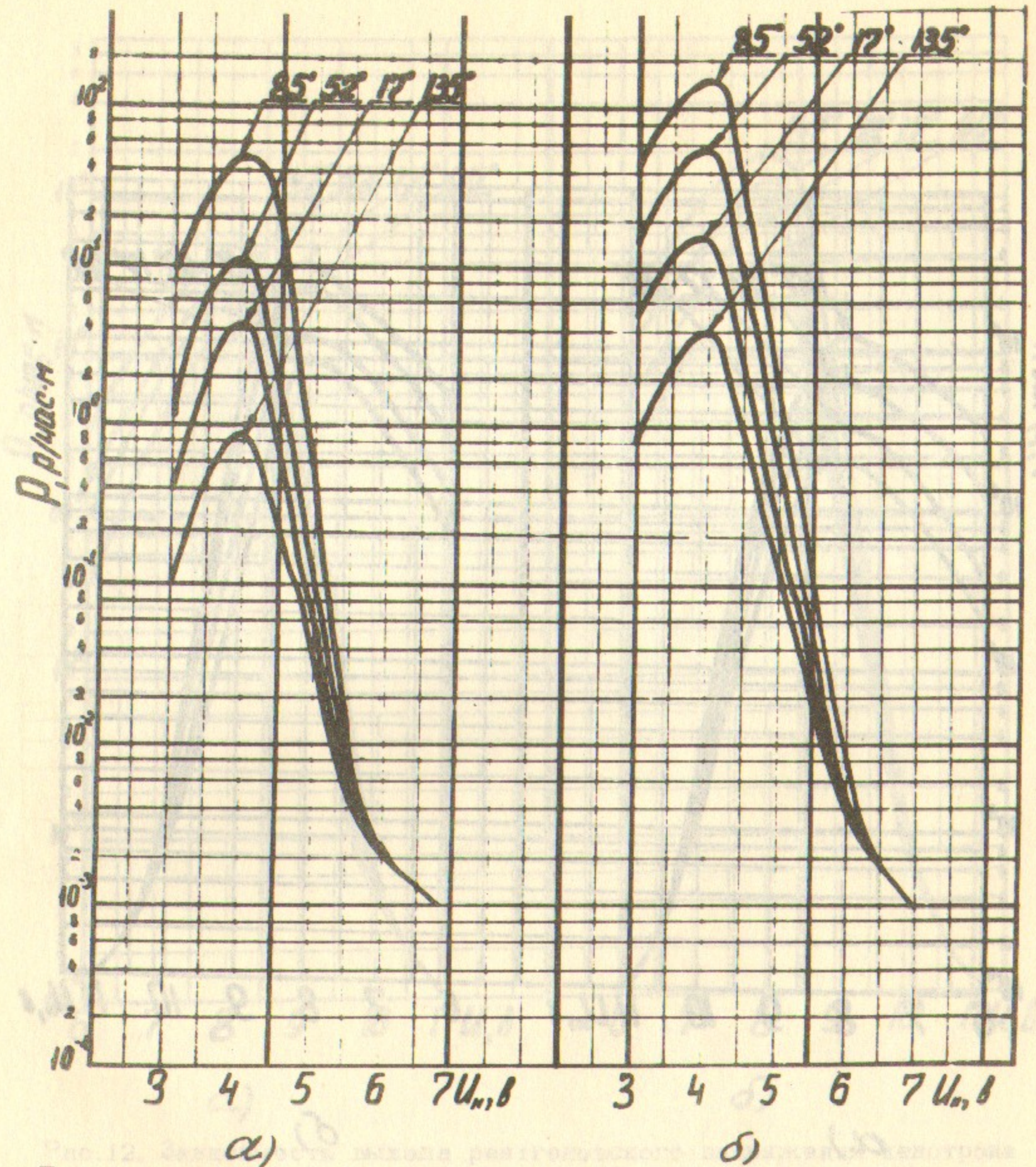
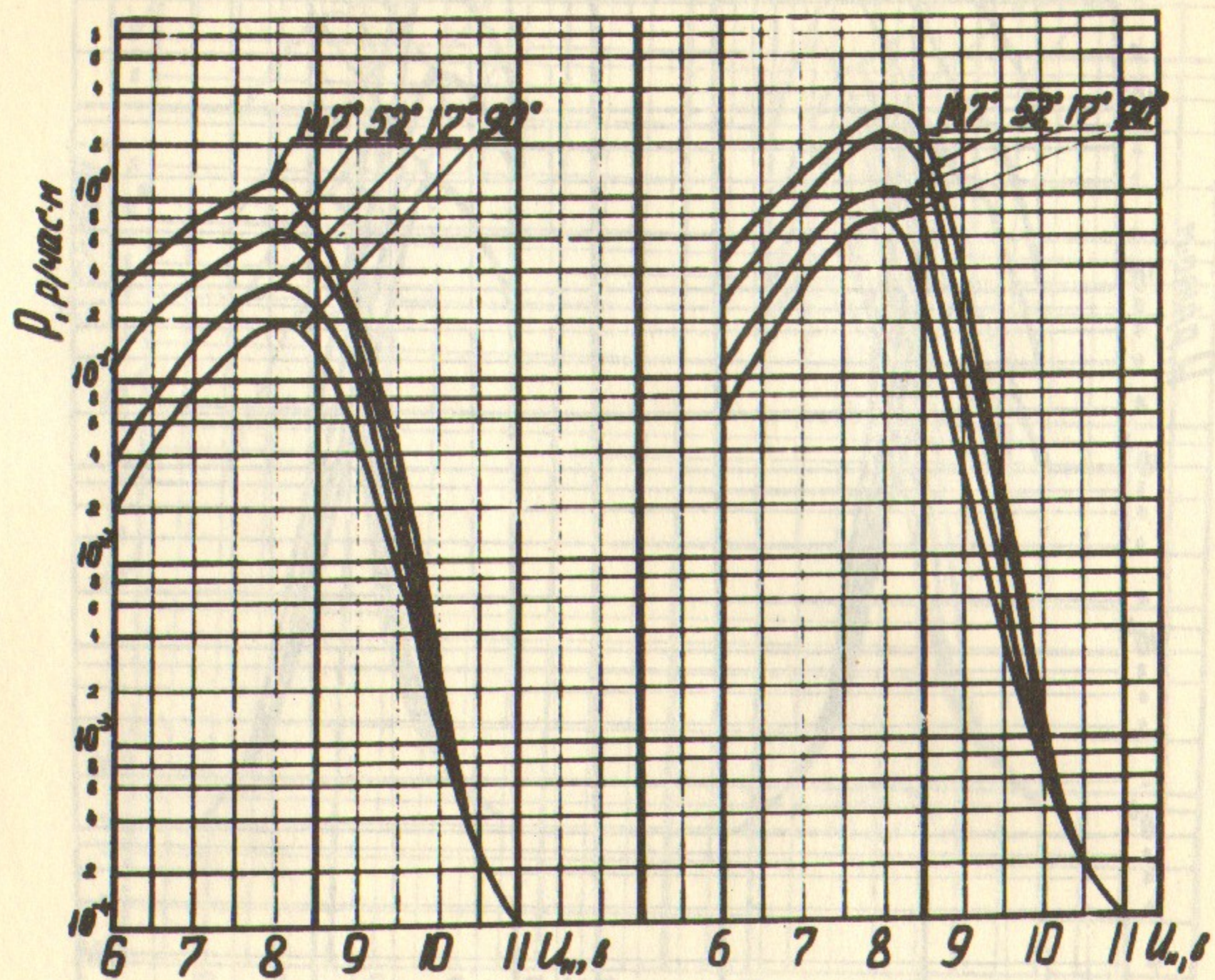


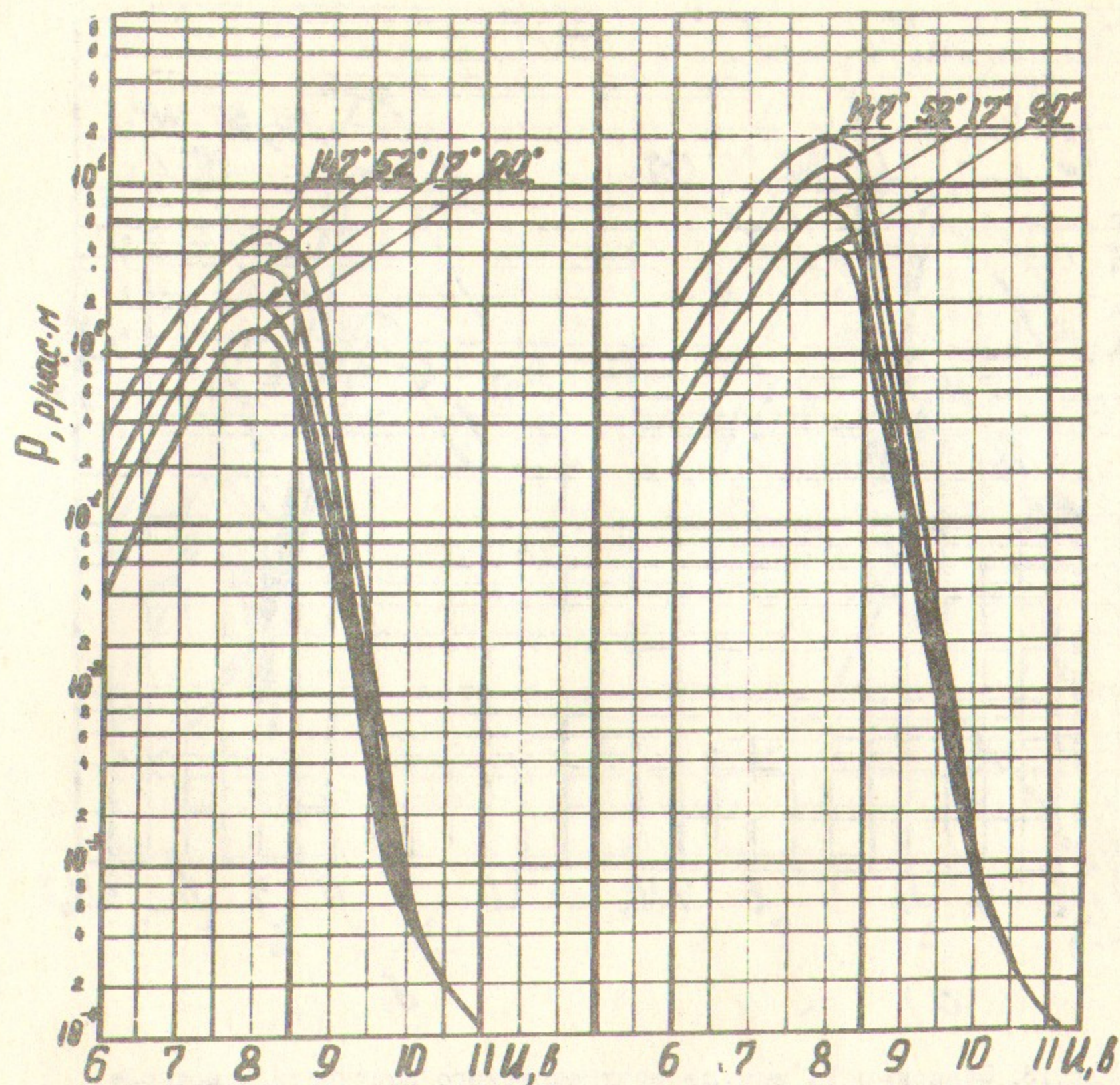
Рис. 10. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-80 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства.
 а) - 50 кв, б) - 60 кв.
 Сопротивление нагрузки - 1,8 мом.



а)

б)

Рис.11. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-110 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - 45 кв, б) - 50 кв. Сопротивление нагрузки - 1,3 мом.



а)

б)

Рис.12. Зависимость выхода рентгеновского напряжения кенотрона типа КРМ-110 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - 55 кв, б) - 75 кв. Сопротивление нагрузки - 1,8 мом.

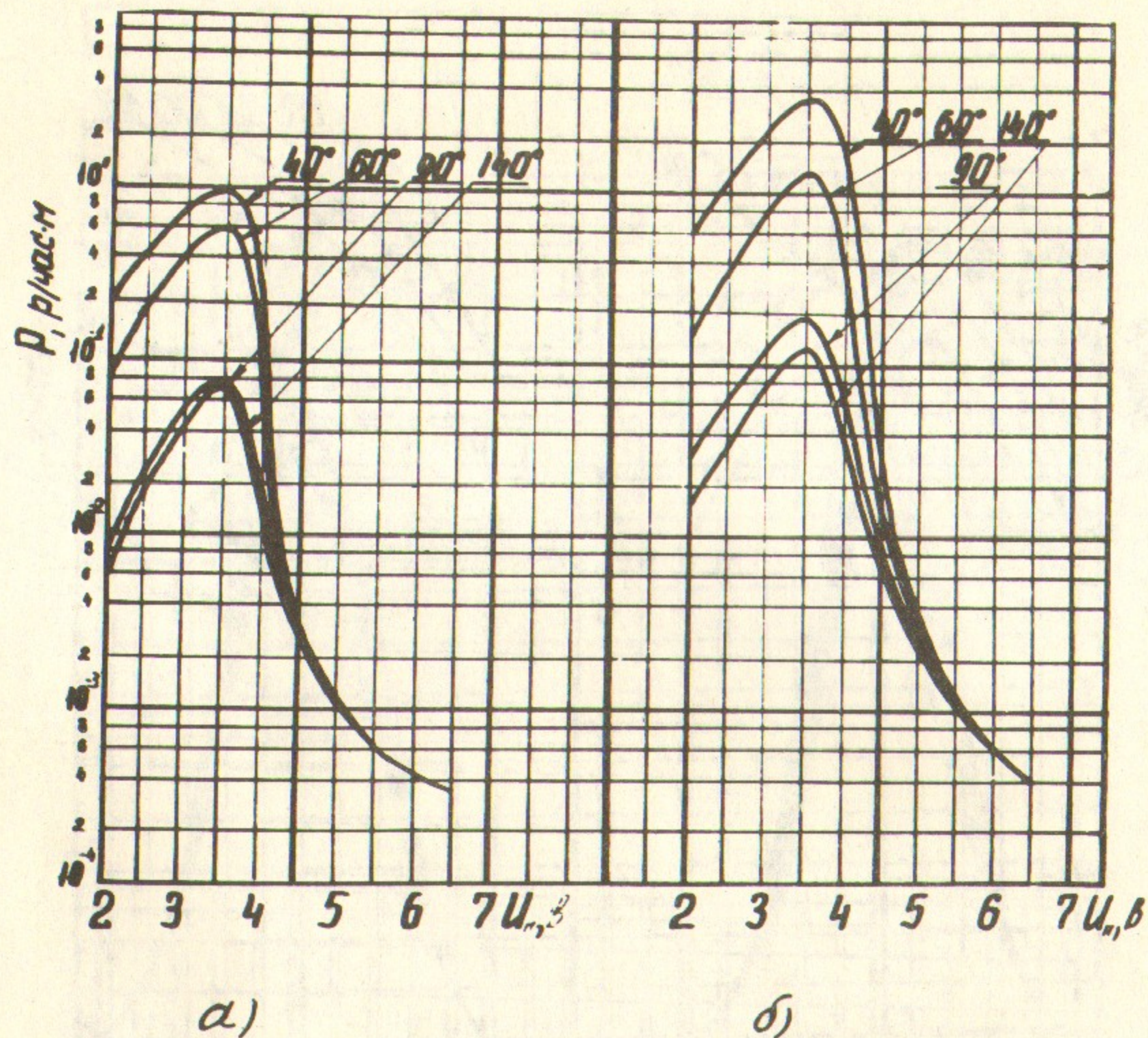


Рис.13. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,15 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - 30 кв, б) - 36 кв. Сопротивление нагрузки - 400 ком.

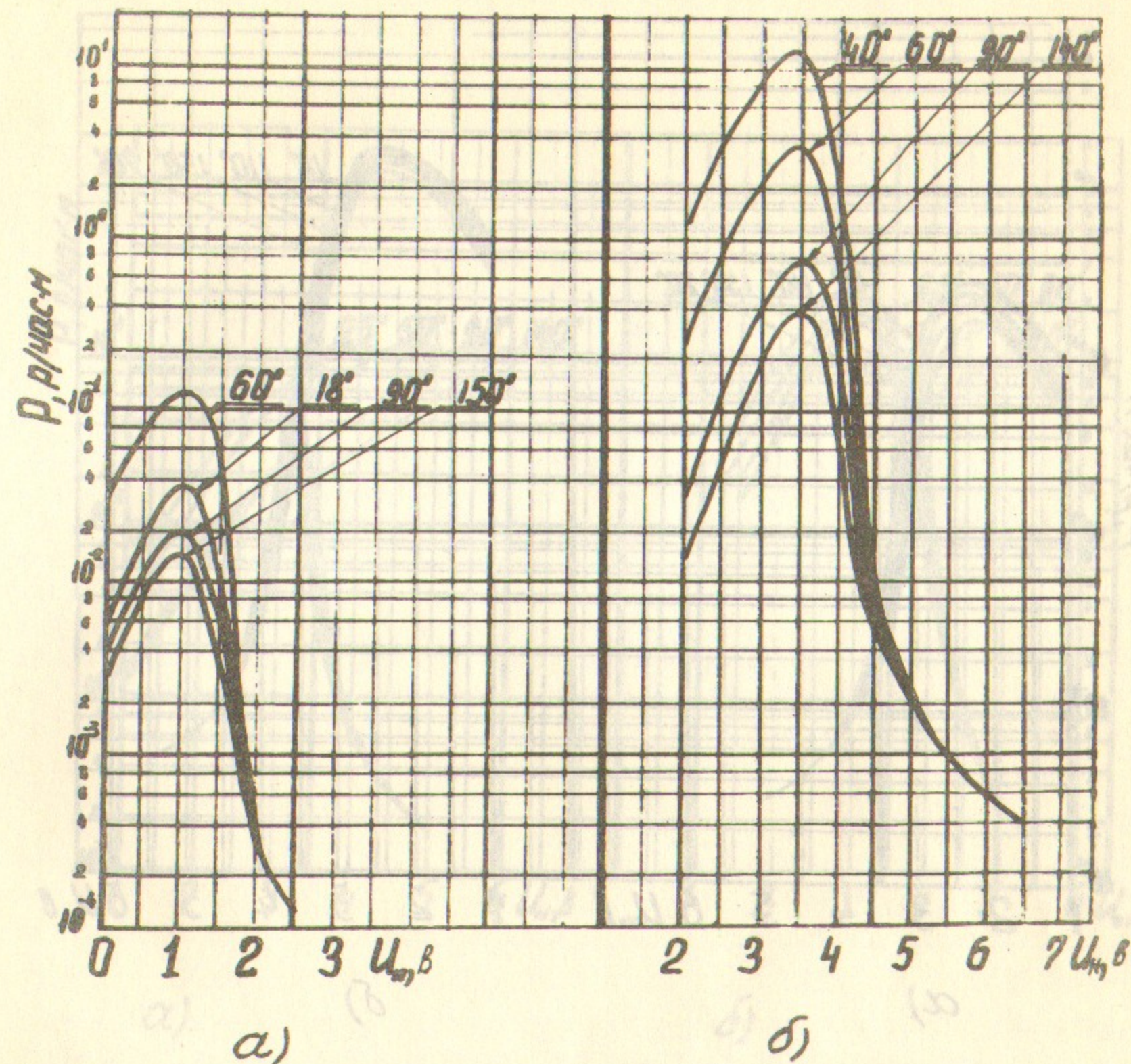


Рис.14. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотронов типа В1-0,02/20 и В1-0,15/55 напряжения накала катодов. Высокое напряжение генераторного устройства. а) - В1-0,02/20 - 20 кв; б) - В1-0,15/55 - 42 кв. Сопротивление нагрузки - 400 ком.

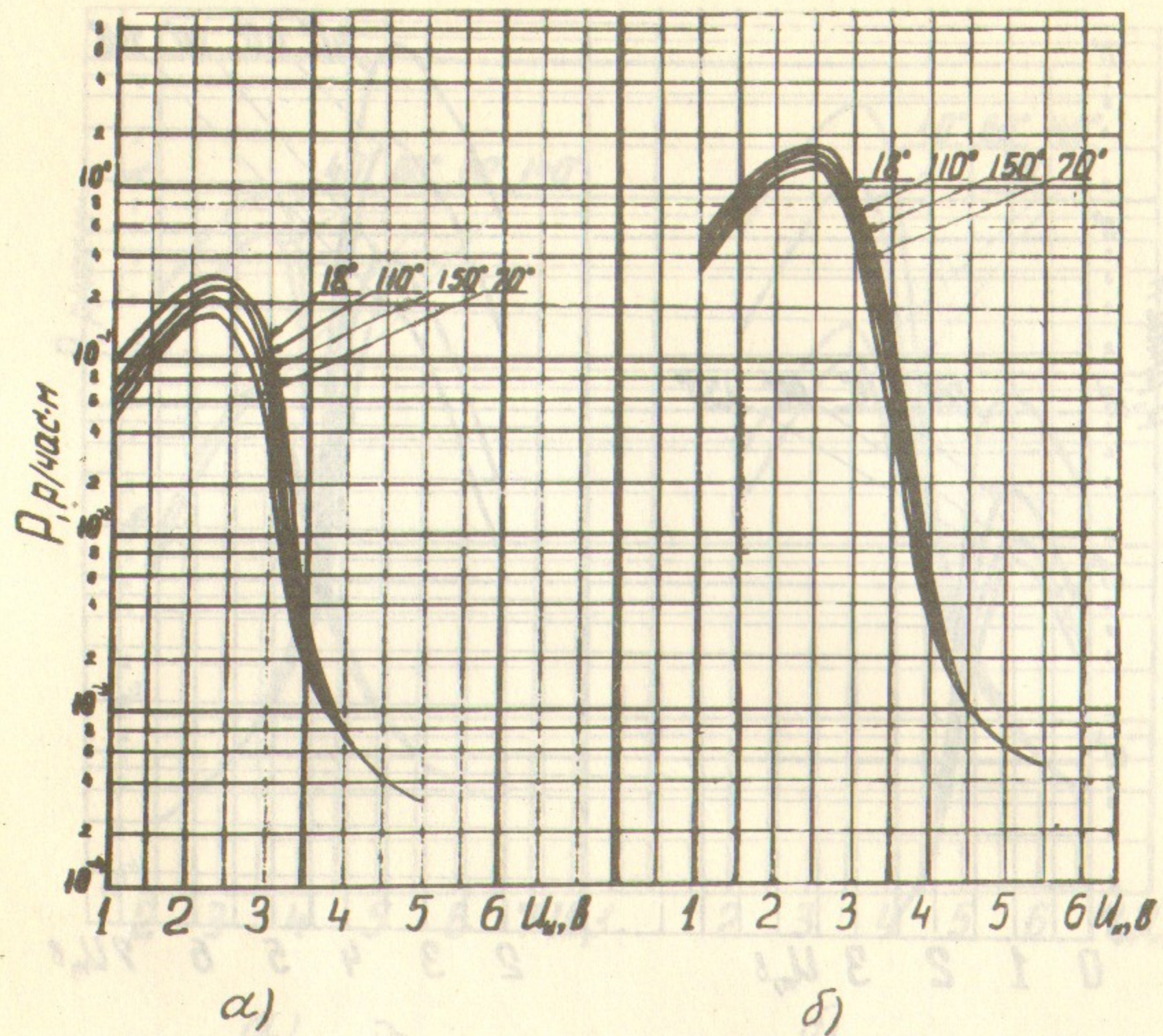


Рис.15. Зависимость выхода рентгеновского напряжения кенотрона типа В1-0,1/40 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства.
 а) - 35 кв; б) - 40 кв.
 Сопротивление нагрузки - 1,25 мом.

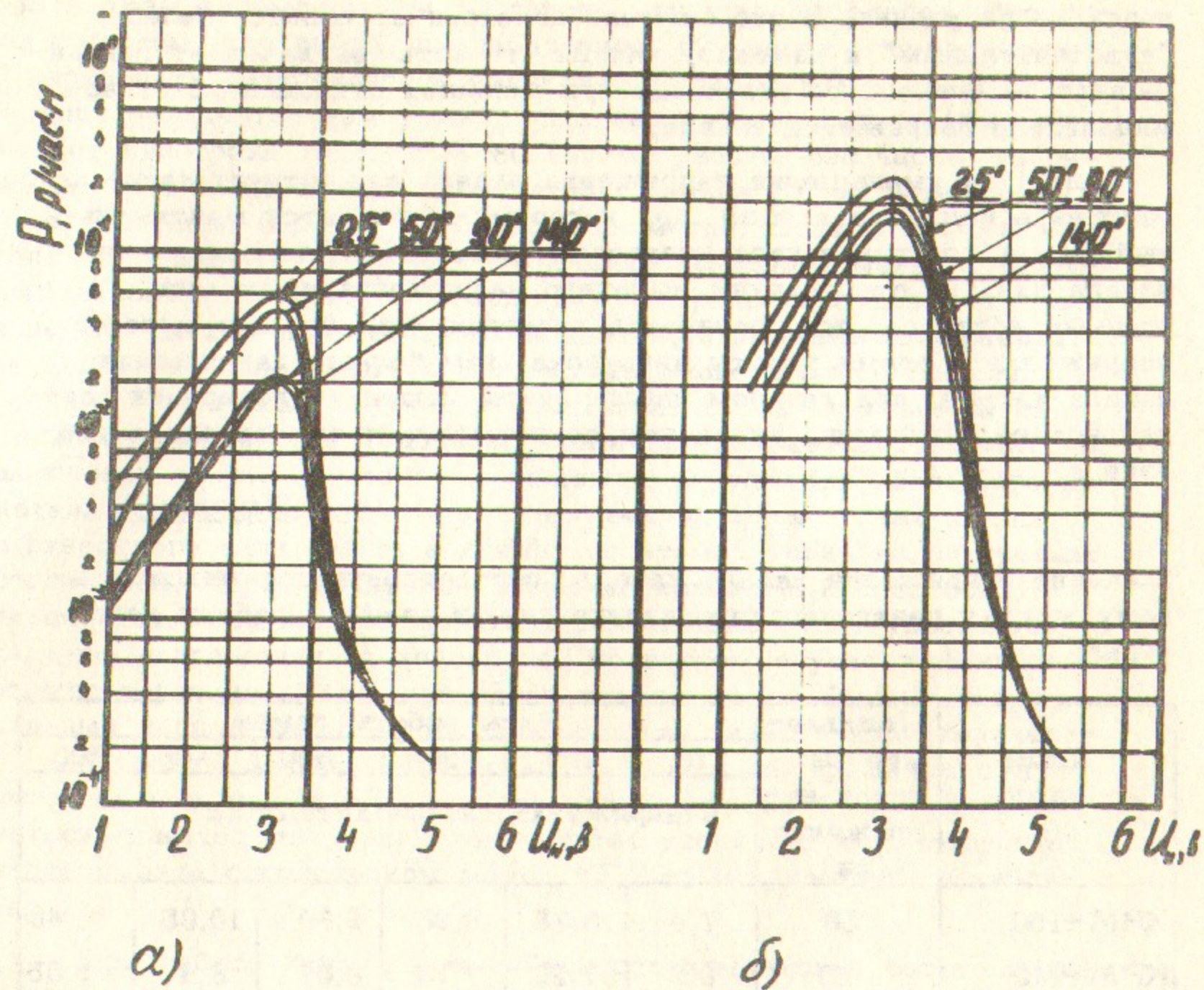


Рис.16. Зависимость выхода рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,1/30 от напряжения накала катода. Высокое напряжение генераторного устройства.
 а) - 26 кв; б) - 30 кв.
 Сопротивление нагрузки - 400 ком.

Таблица 2.

Высокое напряжение 25 кв; напряжение накала 8,9 в.

Время после включения (сек).	10	20	50	60	80	135
Падение напряжения на кенотроне (кв)	13,3	15,4	15,6	16	16,2	16,5
Сила тока в цепи (ма)	6,75	5,6	5,5	5,25	5,1	5,0
Мощность дозы рентгеновского излучения (р/час.м.)	4	6	6,5	6,6	6,7	6,7

Таблица 3.

Высокое напряжение 25 кв, напряжение накала 8,5 в.

Время после включения (сек).	30	60	90	180
Надение напряжения на кенотроне (кв)	17	17,8	18,9	19,6
Сила тока в цепи (ма)	4,5	4	3,75	3
Мощность дозы рентгеновского излучения (р/час.м.)	3,7	3,7	3,6	2,8

затем следует резкое её падение и дальше эмиссия уменьшается по экспоненте, так как металлический торий испаряется безвозвратно. Поддержание постоянного тока накала катода кенотрона при изменении его параметров во время работы увеличивает его

температуру и скорость диффузии атомов тория к поверхности. Но этот режим после истощения катода может привести к большему недокалу, если нет автоматического слежения за током анода.

Величина тока эмиссии катода зависит от анодного напряжения. Поэтому при одинаковом недокале катода выход рентгеновского излучения будет увеличиваться с увеличением анодного напряжения.

На величину недокала катода кенотрона оказывает влияние окружающая среда (температура воздуха или масла), конструкция электродов. Пониженная температура окружающей среды и хороший отвод тепла электродами увеличивают недокал и наоборот, повышенная температура и электроды с меньшей теплопроводностью уменьшают недокал.

а) Высоковольтные кенотроны с оксидными катодами в режиме недокала катода радиационной опасности не представляют. При уменьшении напряжения накала оксидного катода в широких пределах от номинального до 0,4 нормы практически не приводит к изменению анодного тока кенотрона. При дальнейшем уменьшении напряжения накала анодный ток резко падает, практически до нуля. Такое поведение оксидного катода можно объяснить тем, что его высоковольтная характеристика не имеет области насыщения анодного тока. Следует отметить, что при недокале происходит быстрое испарение активного вещества катода, в результате этого лампа выходит из строя. Уменьшение эмиссии оксидного катода начинается после испарения всего лишь 1,5-2% окиси бария, а изменение параметров прибора начинается после потери 15-25% активного вещества /3/. При работе оксидного катода изменяется его химический состав и увеличивается сопротивление. Испарение активного слоя катода зависит от температуры, вакуума, режима работы, размеров катода и т.д. Ускоренное испарение активного вещества частично компенсируется за счёт восстановления его анодным током. При этом на поверхности катода образуется плёнка из веществ с большим сопротивлением и анодный ток дополнительно разогревает катод. Выделение дополнительной мощности на разогрев может достигать до 3 вт/см^2 /4/, что сравнимо с мощностью, необходимой для нормального накала катода.

В эксперименте при уменьшении накала катода скачками на 10-15% наблюдается сначала уменьшение анодного тока и всплеск рентгеновского излучения длительностью около 1 секунды, а затем восстановление анодного тока до первоначальной величины и прекращение генерации рентгеновского излучения. Доза за импульс не превышает 1 мр. Этот процесс может продолжаться при уменьшении напряжения накала вплоть до 0,4 от номинального.

§ 3. Спектрально-угловое распределение интенсивностей рентгеновского излучения в режиме недокала катодов кенотронов

Спектры рентгеновского излучения кенотронов снимались спектрометром, состоящим из пропорционального счётчика марки СРМ-1 и амплитудного анализатора импульсов АИ-100. Высокое напряжение на счётчик подавалось от выпрямителя ВС-22. Для согласования высокого выходного сопротивления счётчика с входным сопротивлением анализатора и предварительного усиления использовался специальный усилитель на транзисторах с коэффициентом усиления 60. Нелинейность амплитудной характеристики усилителя в диапазоне от 2 до 100 мВ входного сигнала не превышает $\pm 1\%$. Входное сопротивление более 1,0 мОм. Принципиальная схема усилителя дана на рис.17. С целью уменьшения шумов и наводок усилитель монтировался в медном цилиндре, который плотно насаживался на торец счётчика СРМ-1. Вводы питания счётчика и усилителя, вывод сигнального кабеля тщательно пропаивались и осуществлялись только экранированным проводом.

Эффективность счётчика зависит от энергии излучения, атомного номера и давления газа, наполняющего счётчик, его геометрических размеров. Кроме того, на эффективность оказывают влияние поглощение излучения материалом окна и стеночный эффект /5,6,7/. Счётчик СРМ-1 наполнен ксеноном при давлении 650 мм рт.ст. и изопентаном при 10 мм рт.ст., внутренний диаметр счётчика 50 мм, окно счётчика состоит из слюды толщиной 10 мк и алюминия - 5 мк.

Если энергия кванта не превышает энергию К-скачка поглощения газа, наполняющего счётчик, то эффективность определяется

по формуле:

$$\epsilon_i = (1 - e^{-\mu_{i1} X_1}) e^{-\mu_{i2} X_2}$$

где μ_{i1} - коэффициент поглощения в газе квантов с энергией E_i ($\text{см}^2/\text{г}$); X_1 - толщина ^{слоя} газа ($\text{г}/\text{см}^2$); μ_{i2} - коэффициент ослабления в материале окна счётчика квантов с энергией E_i ($\text{см}^2/\text{г}$); X_2 - толщина материала окна счётчика ($\text{г}/\text{см}^2$).

Если энергия квантов превышает энергию К-скачка, то при их поглощении в газе счётчика образуется характеристическое рентгеновское излучение, которое может покинуть рабочий объём счётчика. Число квантов характеристического излучения, покинувших счётчик, будет пропорционально выходу флуоресценции. Расчёт показывает, что для СРМ-1 число поглотившихся характеристических квантов составляет приблизительно 2% и поэтому ими можно пренебречь. Тогда эффективность счётчика в % без учёта угловой поправки (рис.18) можно рассчитать по формуле:

$$\epsilon_i = (1 - e^{-\mu_{i1} X_1}) e^{-\mu_{i2} X_2} (1 - \omega) 100\%$$

Разрешение счётчика (рис.19) определялось экспериментально по характеристическому рентгеновскому излучению. Если послать пучок рентгеновских лучей на металлическую фольгу, то лучи, рассеянные на угол 90° , будут преимущественно характеристическим излучением материала фольги /8/. Проверка линейности шкалы энергий спектрометра проводилась изотопами $^{95}\text{Am}^{242}$ (42кэв), $^{94}\text{Pu}^{239}$ (38 и 50 кэв) и $^{26}\text{Fe}^{55}$ (5,9 кэв).

При взаимодействии квантов рентгеновского излучения с газом счётчика, часть образовавшихся при этом электронов падает на стенки. Кроме того, ионы, образовавшиеся вблизи стенки, из-за слабого электрического поля в этом месте не все будут притянуты на анод счётчика. В результате этих эффектов получают импульсы меньшей амплитуды. Если поместить счётчик в постоянное магнитное поле, то указанные эффекты уменьшатся из-за изменения траектории полета электронов и улучшится разрешение счётчика /8/. Для этих целей на счётчики типа СРМ-1 наматывали катушки из 5200 витков медного провода диаметром 1,2 мм,

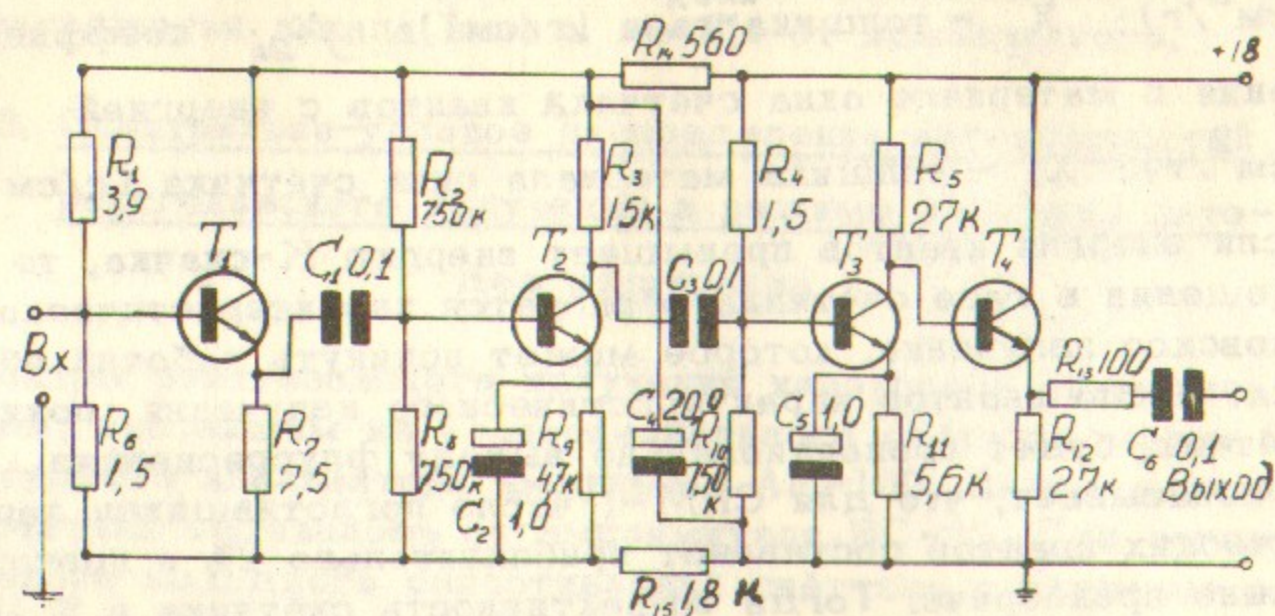


Рис.17. Усилитель с большим входным сопротивлением
 T_1, T_2, T_3, T_4 - КТ 312 А.

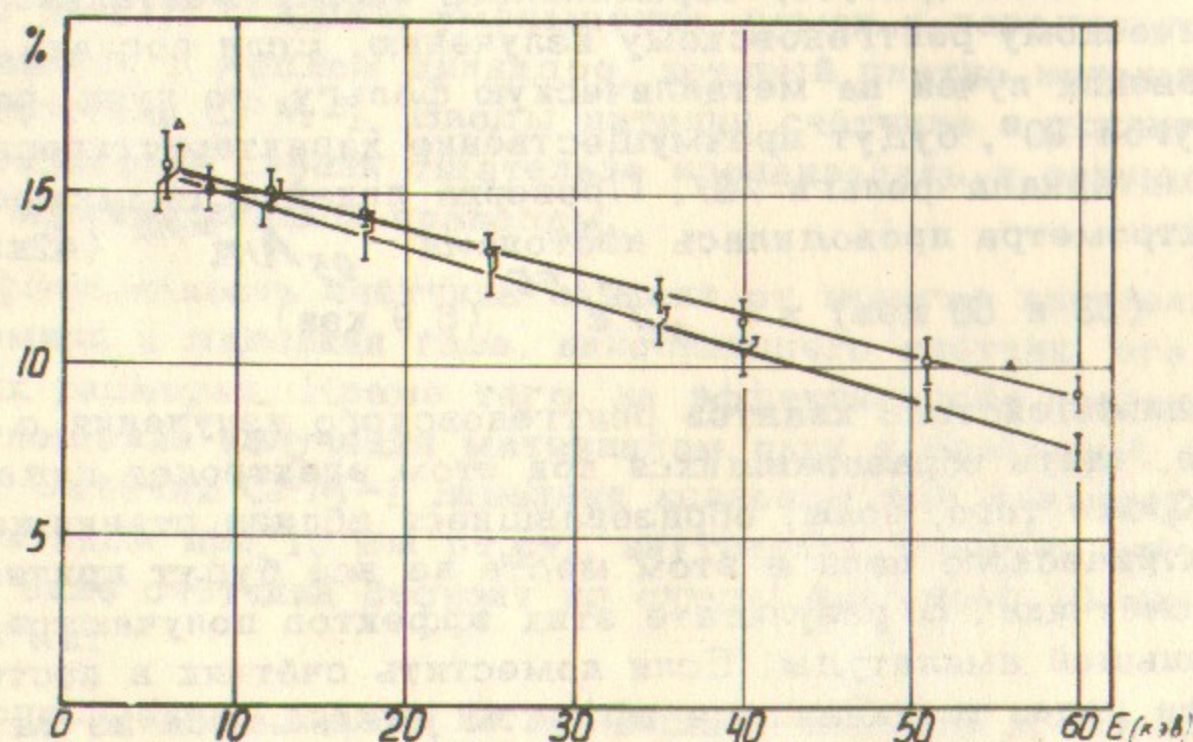


Рис.18. Эффективность счётчика СРМ-1.

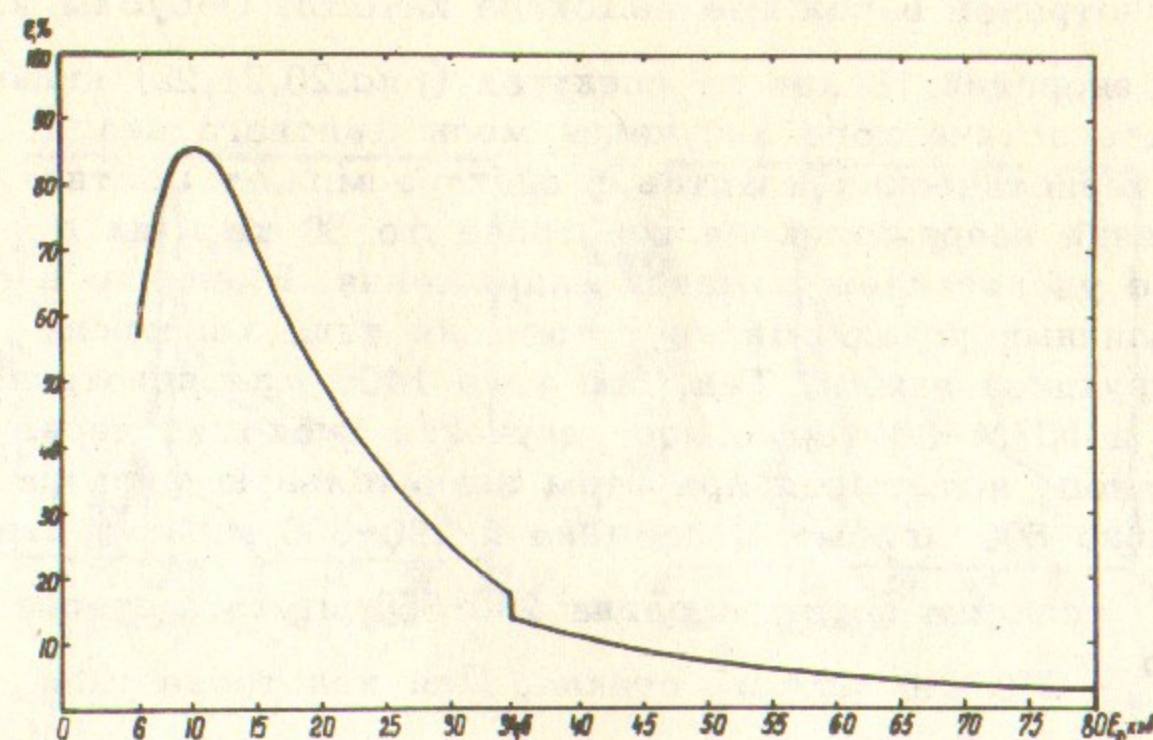


Рис.19. Разрешение счётчика СРМ-1.

Δ - паспортные данные; 0 - разрешение без магнитного поля; ● - разрешение с магнитным полем.

через которые пропускался ток силой в 4 а. Установлено, что улучшение в разрешении, превышающее среднеквадратичную ошибку, наблюдается только при энергии квантов более 40 кэв (рис.19). Расстояние между кенотроном и счётчиком было 140 см. Для уменьшения скорости счёта и улучшения разрешения применялся алюминиевый коллиматор диаметром 1 мм и длиной 30 мм. При больших интенсивностях рентгеновского излучения расстояние от кенотрона до счётчика увеличивалось до необходимого, чтобы скорость счёта была приблизительно 1000 имп/сек. Было снято около 300 спектров.

Обработка спектров проводилась согласно методике по обработке непрерывных и сложных спектров, описанной в работе /8/. Поправка на энергетическое разрешение спектрометра находилась решением соответствующих уравнений методом последовательных

приближений на электронно-вычислительной машине.

На рис.20-28 представлены спектры рентгеновского излучения различных кенотронов в режиме недокала катода. Обсудим их.

Пики с энергией 18 кэв на спектрах (рис.20,21,22) являются пиками характеристического излучения молибденового анода. Количество характеристических квантов в спектре может достигать 40% при падении напряжения на кенотроне до 30 кв, и их доля уменьшится с увеличением падения напряжения. Различие в спектрах при различных углах одного и того же типа кенотрона объясняется конструкцией лампы. Так, при угле 140° для кенотронов типа КРМ-150 и КРМ-80 тормозное излучение проходит через молибденовый анод, испытывая при этом значительную фильтрацию (приблизительно 500 мг/см^2 молибдена и $280-350 \text{ мг/см}^2$ стекла). Для угла 10° толщина фильтра равна $280-350 \text{ мг/см}^2$ стекла, а для угла 80° - $210-240 \text{ мг/см}^2$ стекла. Для кенотрона типа КРМ-110 и угла 50° толщина фильтра равна приблизительно 280 мг/см^2 молибдена и $180-200 \text{ мг/см}^2$ стекла. Выход тормозного излучения при падении напряжения на кенотроне менее 20 кв наблюдается в том случае, если оно испытывает фильтрацию только стенками колбы. Так как толщина стенок колбы у кенотрона типа КРМ-80 приблизительно на 100 мг/см^2 больше, чем у КРМ-150, то проникновение рентгеновского излучения у КРМ-80 через стенки колбы начинается с энергии квантов приблизительно на 5 кэв большей, чем у КРМ-150.

Спектры, представленные на рис.23-25, являются обычными тормозными спектрами фильтрованного анодным электродом рентгеновского излучения. Характеристическое излучение анодов с энергией около 8 кэв (никель, железо) поглощается стенками колбы, и поэтому оно не наблюдается. Так как конструкция анодов у всех этих кенотронов цилиндрическая, то при малых углах излучение фильтруется только стенками колбы, и оно начинает проникать через стекло приблизительно с 10 кэв. Выход квантов с энергией 10 кэв при угле 147° (рис.24) объясняется наличием отверстий в конструкции анода.

Ширина энергетического спектра со стороны низких энергий ограничивается конструкцией и материалом электродов кенотронов, а со стороны высоких энергий - падением напряжения на кенотроне.

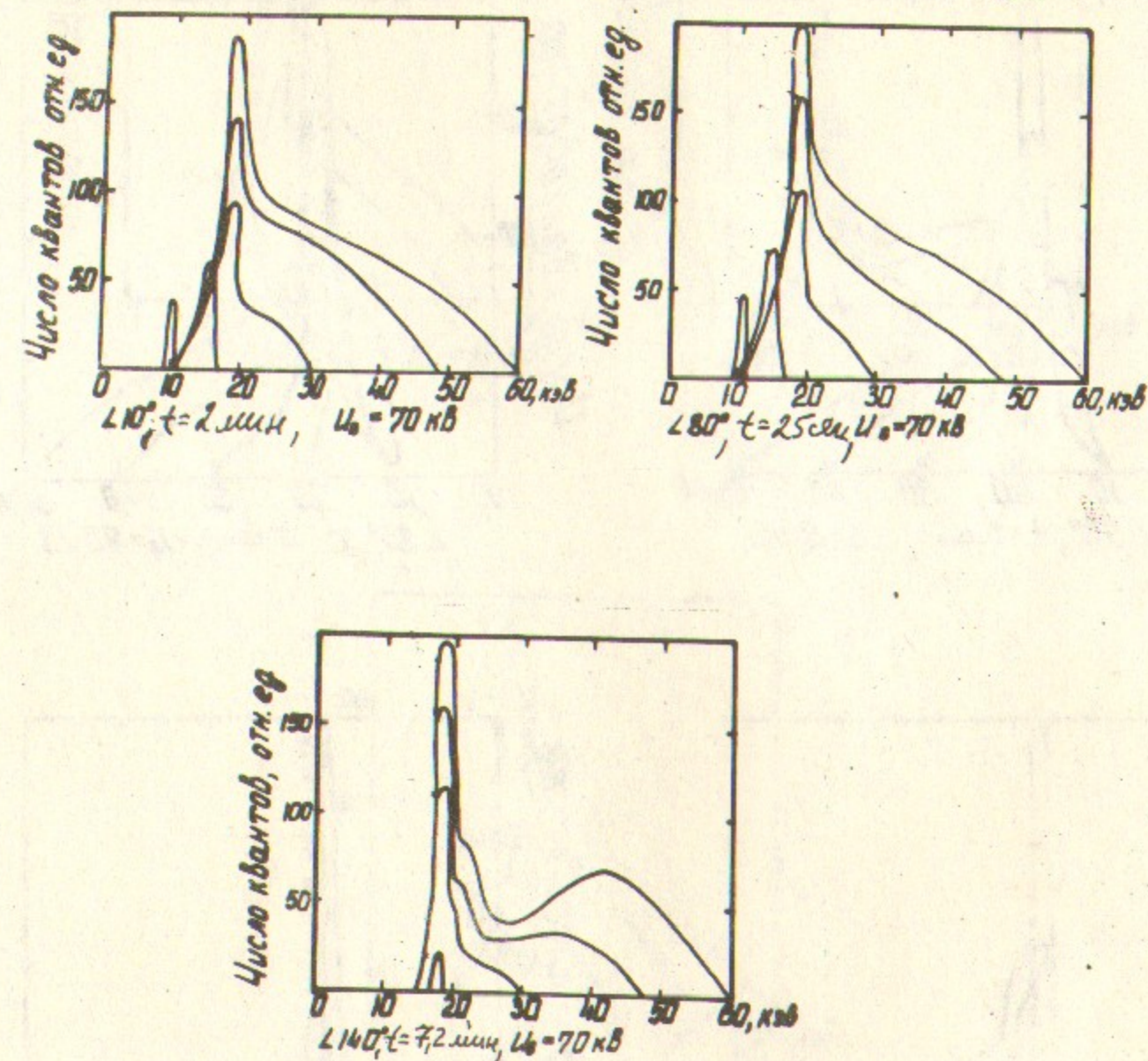


Рис.20. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-150.

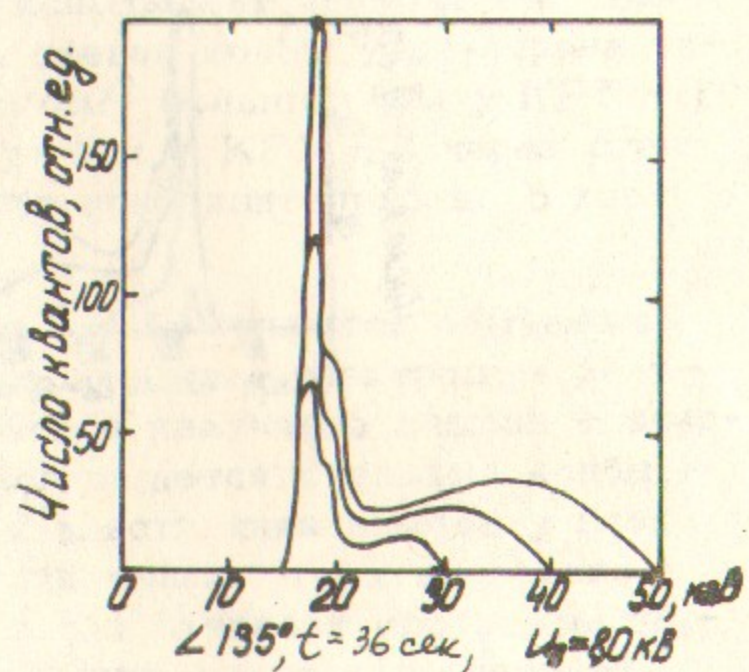
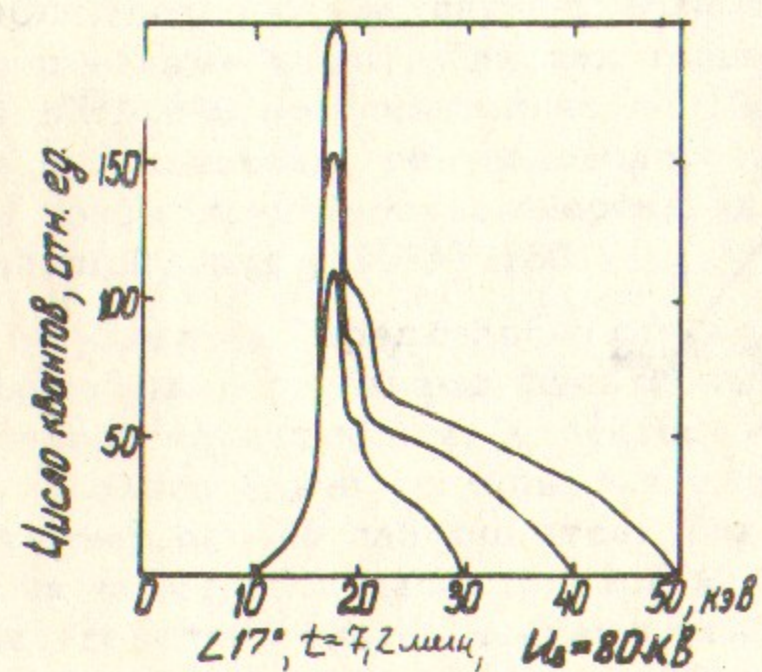
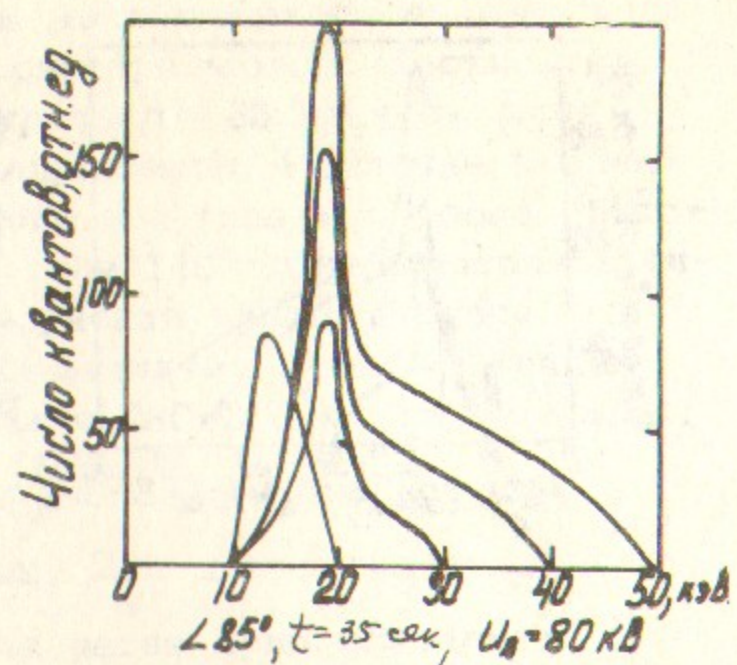
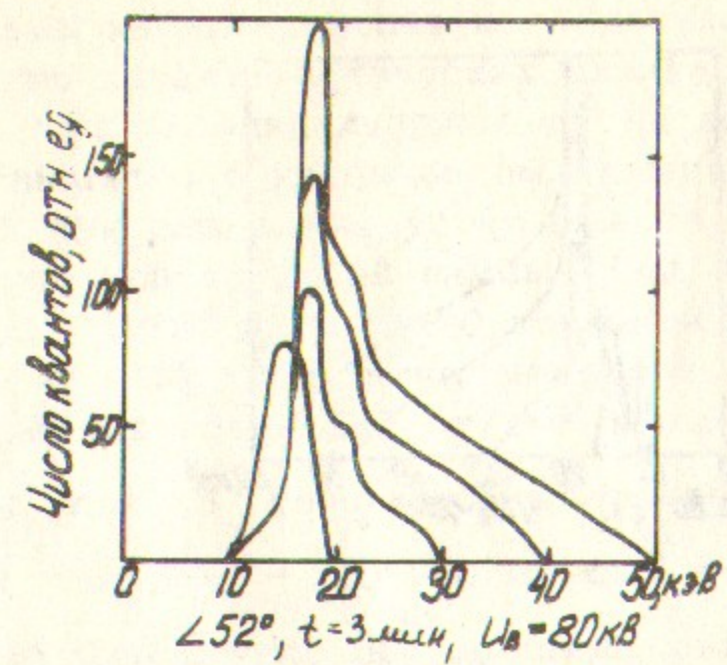


Рис.21. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-80.

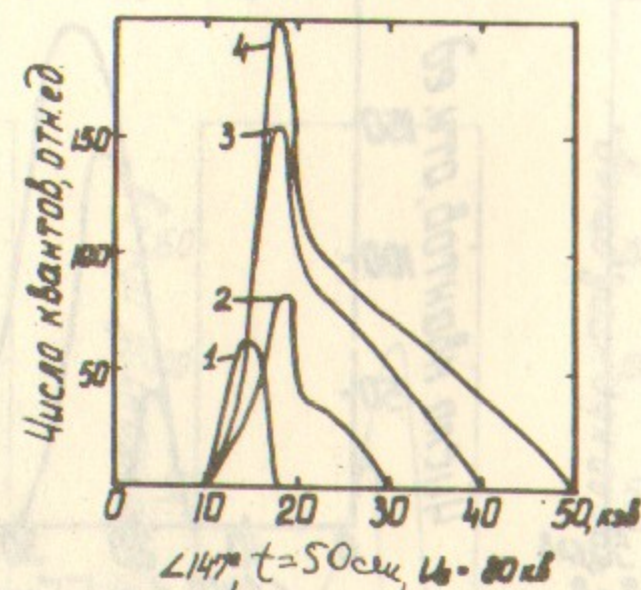
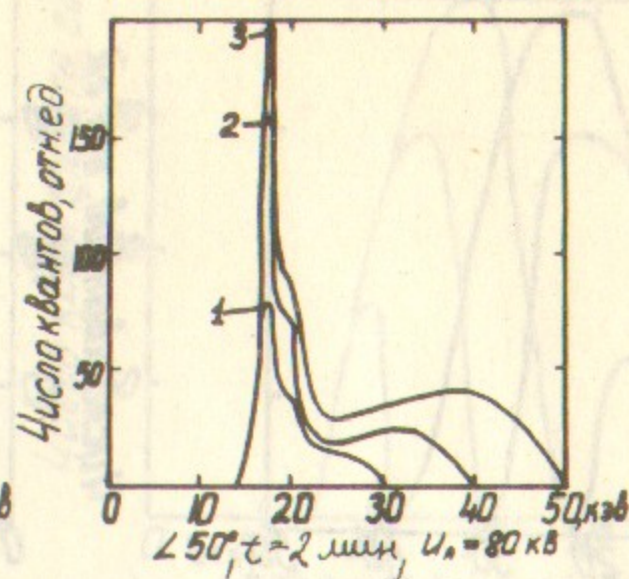
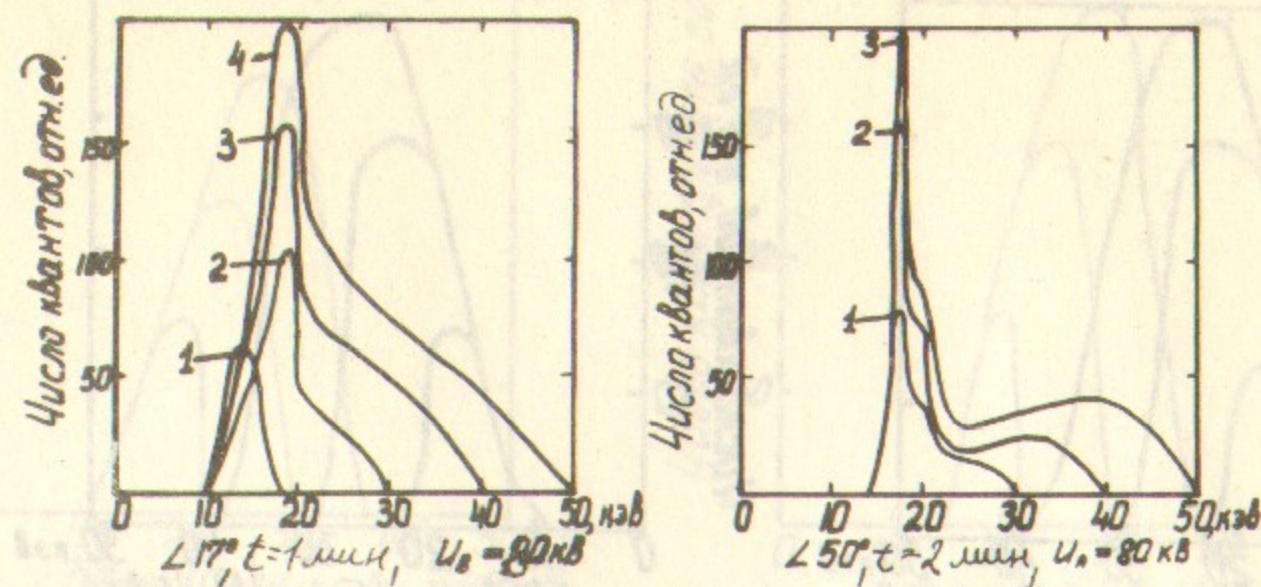


Рис.22. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-110.

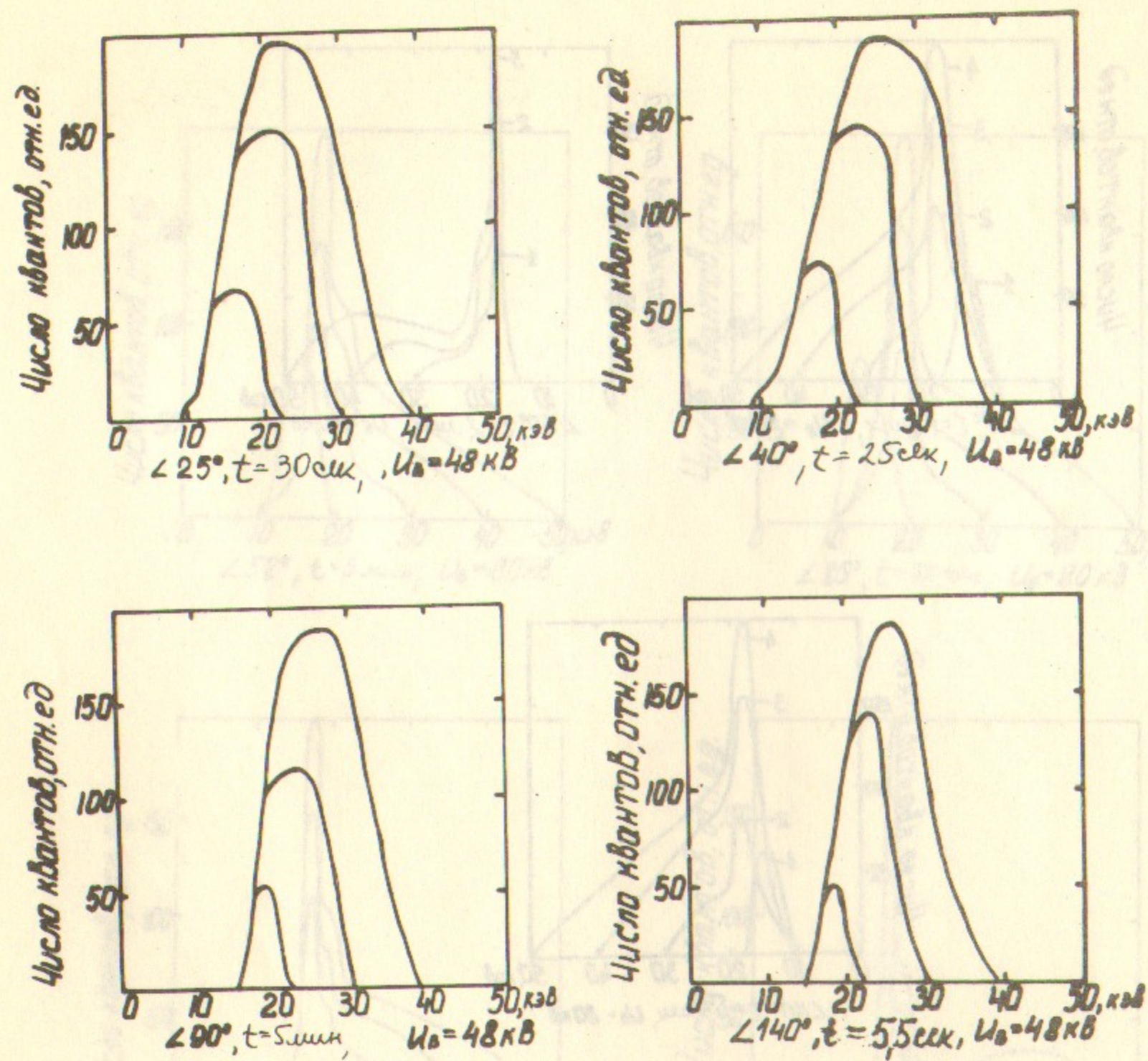


Рис.23. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,15/55.

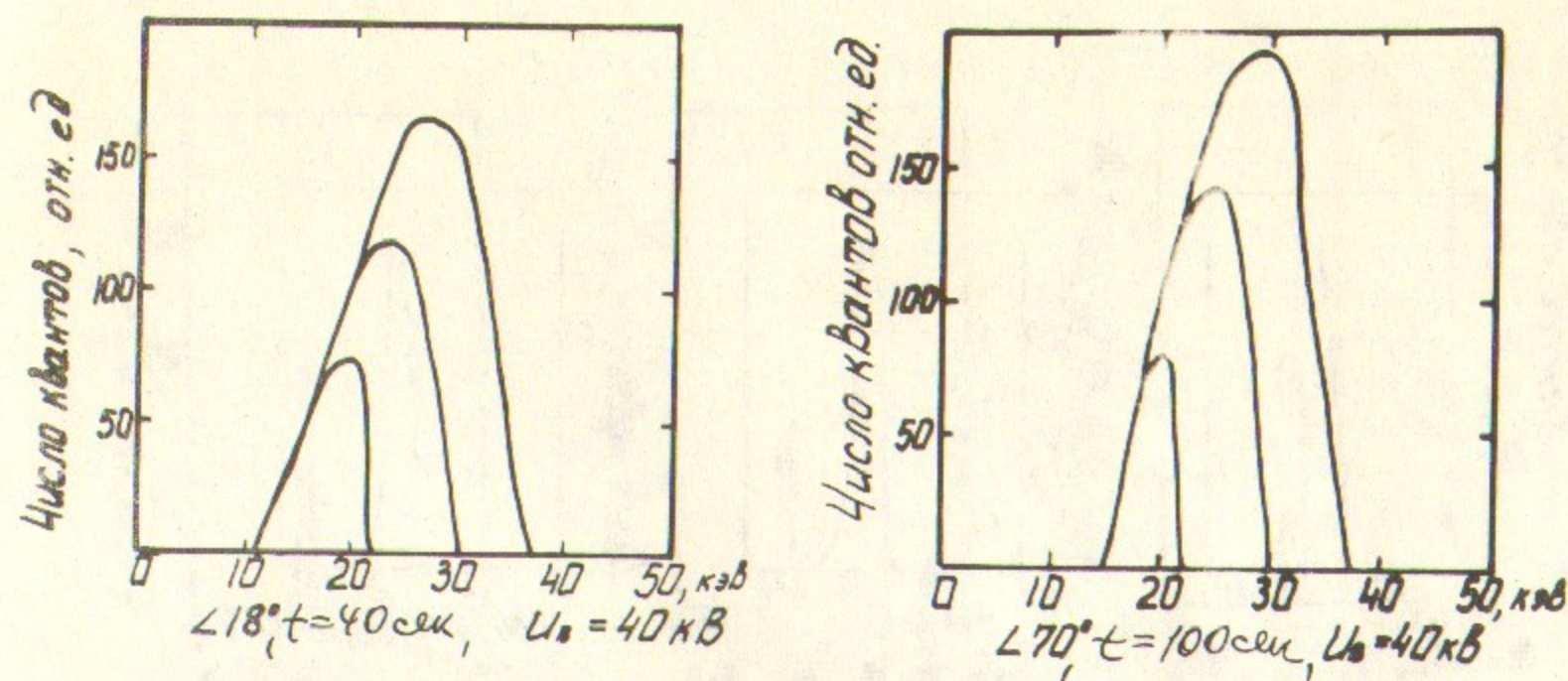


Рис.24. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,1/40.

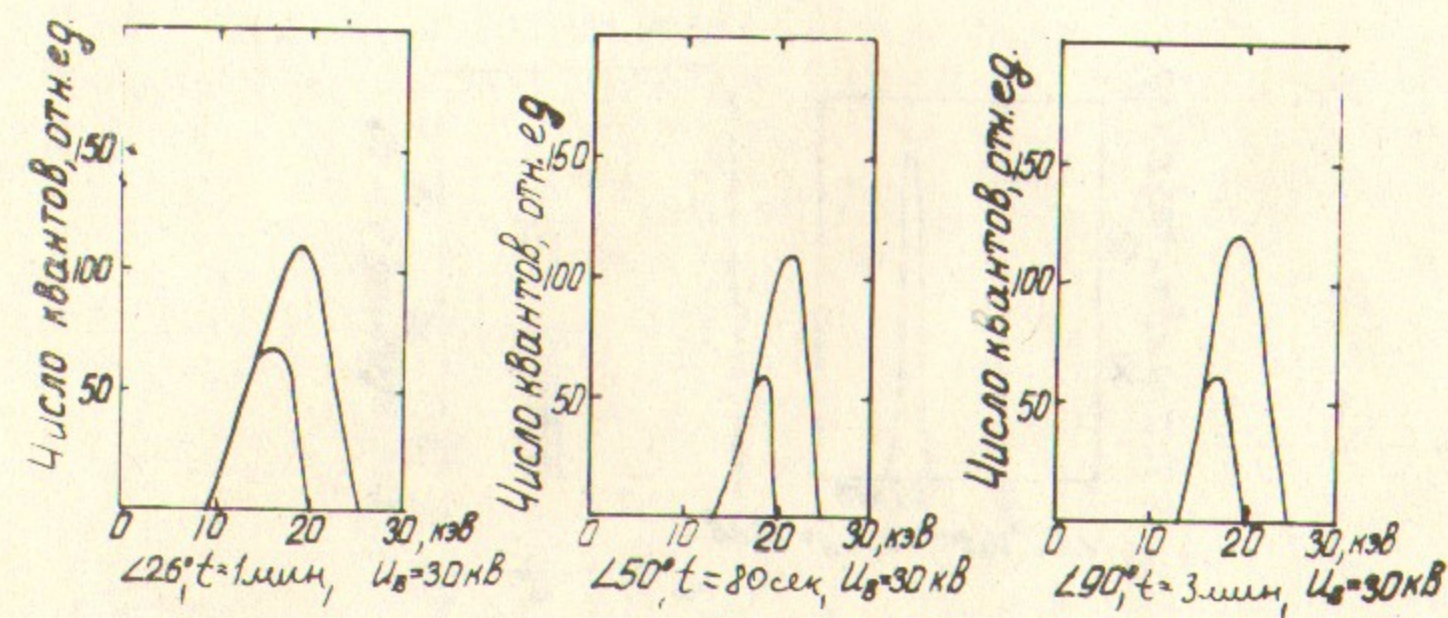


Рис.25. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,1/30.

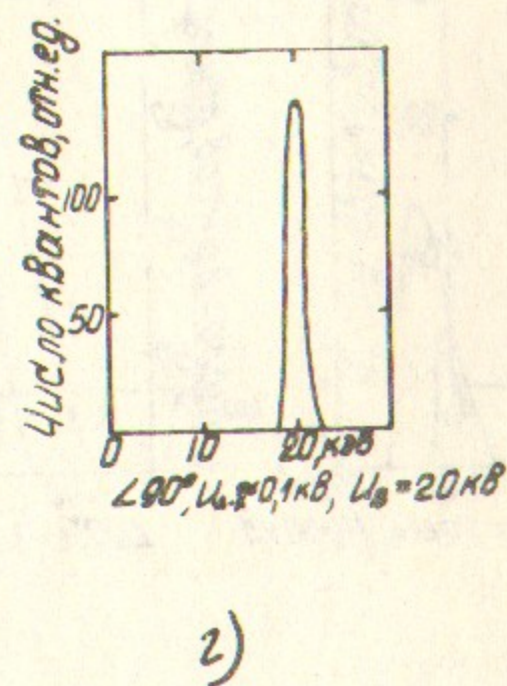
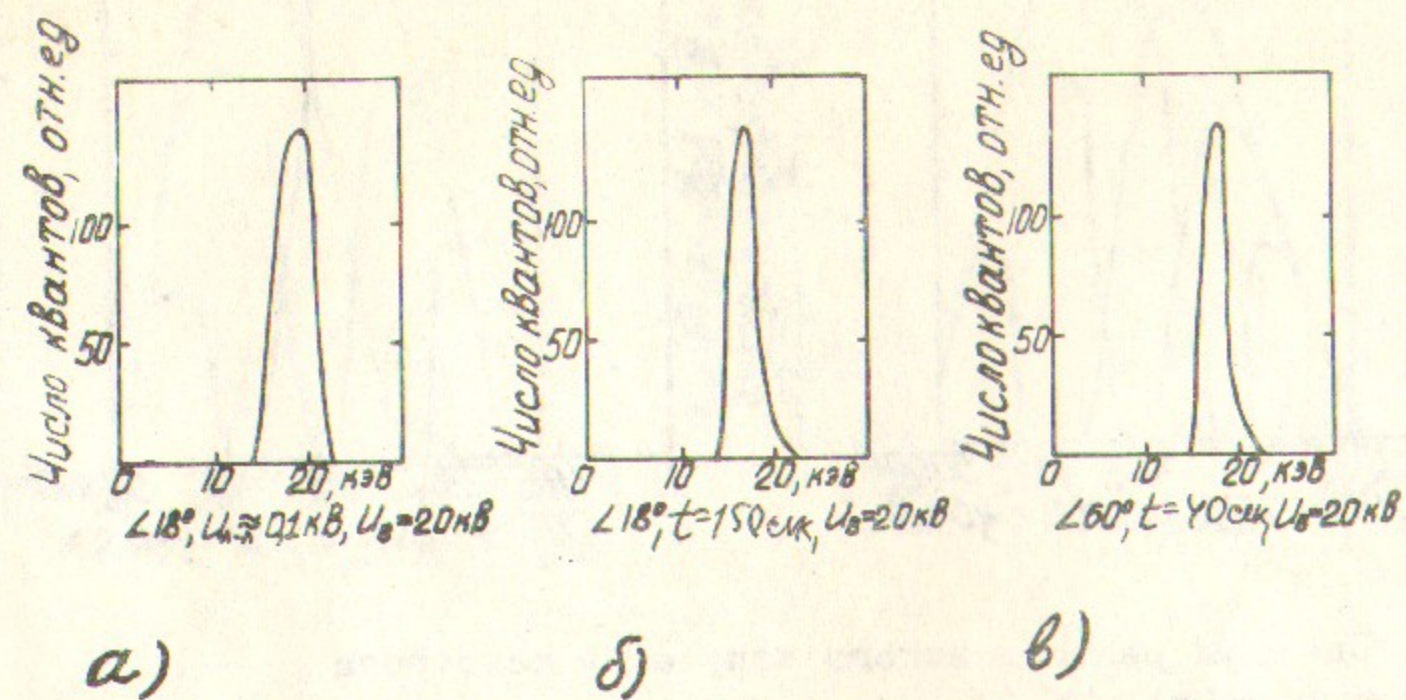


Рис.26. Спектры рентгеновского излучения кенотрона типа В1-0,02/20.
 б), в) - в режиме недокала катода кенотрона;
 а), г) - в режиме загазованного кенотрона.

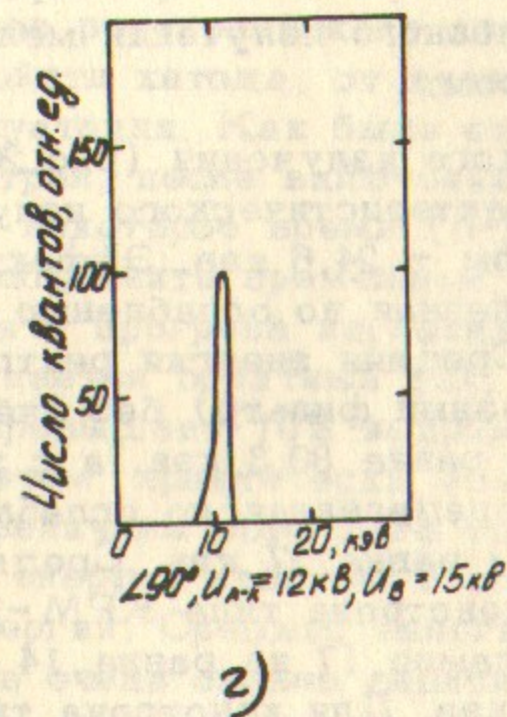
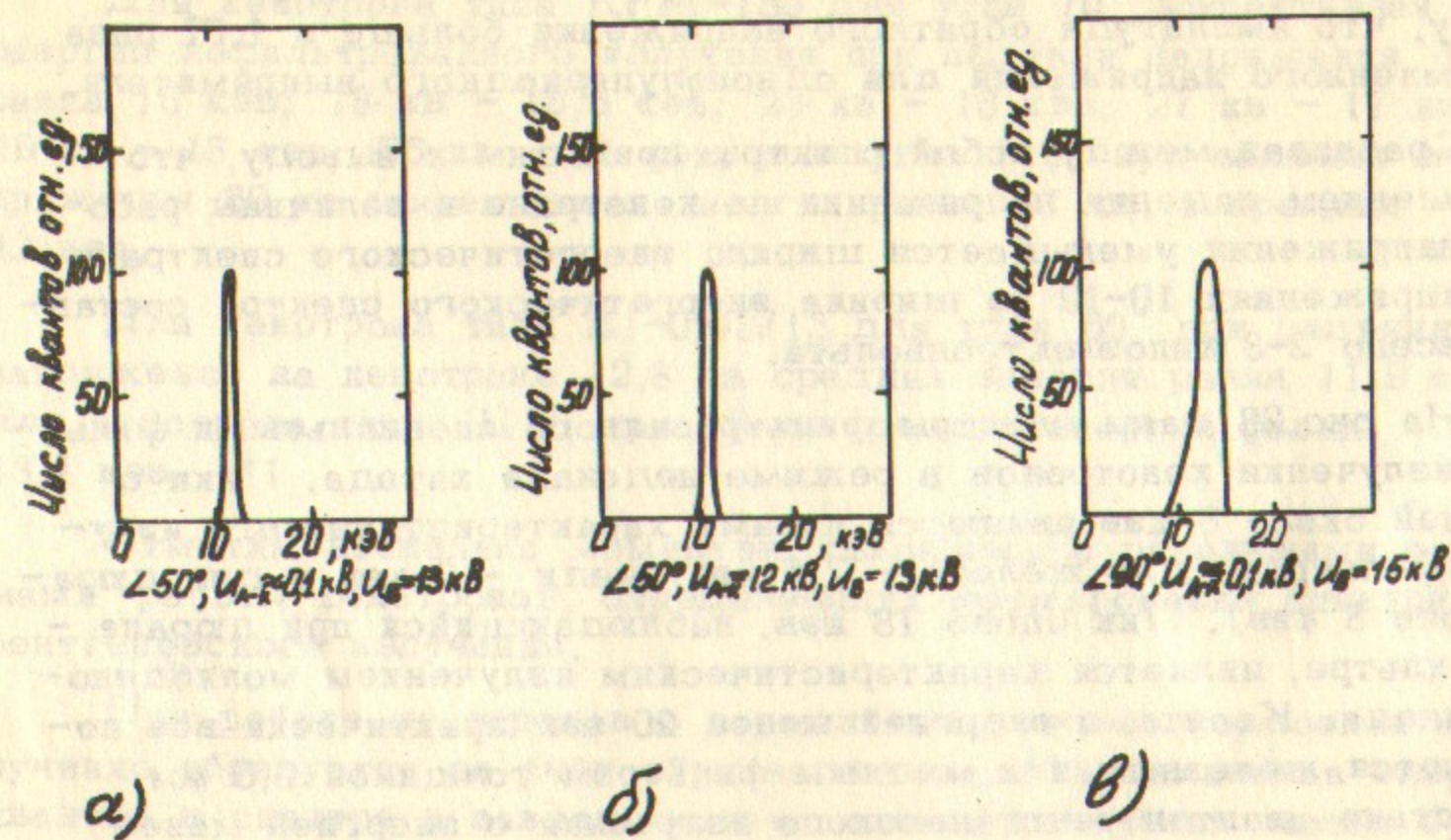


Рис.27. Спектры рентгеновского излучения кенотронов.
 а) в режиме загазованного кенотрона типа В1-0,03/13;
 б) в режиме недокала катода (В1-0,03/13);
 в) в режиме загазованного кенотрона типа 1Ц1С;
 г) в режиме недокала катода (1Ц1С). Катод весь испарился в процессе эксперимента.

На рис.26а,г и рис.27а,в представлены спектры рентгеновского излучения загазованных кенотронов. Максимальная энергия квантов больше величины выпрямленного напряжения. Это происходит потому, что амплитуда обратного напряжения больше в 1,57 раза выпрямленного напряжения для однополупериодного выпрямителя.

Сравнивая между собой спектры приходим к выводу, что с уменьшением падения напряжения на кенотроне и величины рабочего напряжения уменьшается ширина энергетического спектра и при напряжениях 10-12 кв ширина энергетического спектра составляет всего 2-3 килоэлектронвольта.

На рис.28 даны спектры фильтрованного специальными фильтрами излучения кенотронов в режиме недокала катода. Пики с энергией около 8 кэв являются пиками характеристического излучения фильтров (для железа - 7,5 кэв, меди - 8 кэв и для дюрала около 8 кэв). Пик около 18 кэв, наблюдающийся при дюралевом фильтре, является характеристическим излучением молибденового анода. Кванты с энергией менее 20 кэв практически все поглощаются железным или медным фильтром толщиной 0,5 мм. Отсутствие квантов рентгеновского излучения с энергией менее 18 кэв в тормозном спектре после дюралевого фильтра для угла 90° объясняется фильтрацией тормозного излучения молибденовым анодом кенотрона и самим фильтром.

Средняя энергия рентгеновского излучения (рис.28, угол 17° дюралевый фильтр) без учёта характеристического излучения фильтра равна 25,2 кэв, а с учётом - 24,6 кэв. Эффективная энергия для этих же условий, определенная по ослаблению в 2 мм алюминиевом фильтре равна 21 кэв. Средняя энергия рентгеновского излучения (рис.28, угол 17° , железный фильтр) без учёта характеристического излучения фильтра равна 30,3 кэв, а с учётом 28,9 кэв. Эффективная энергия, определенная по ослаблению железным фильтром толщиной 0,5 мм равна 27 кэв. Средняя энергия нефильтрованного излучения для кенотрона типа КРМ-110, угла 147° при падении напряжения на лампе 17 кв равна 14 кэв; при 30 кв - 19,4 кэв, при 40 кв - 23 кэв. Для кенотрона типа В1-0,1/40 для угла 18° при падении напряжения на кенотроне, равном 36 кв средняя энергия нефильтрованного излучения равна 22 кэв, эффективная энергия, определенная до 2 мм алюминиевому фильтру, равна 20 кэв, после этого фильтра средняя энергия равна 27 кэв, а эффективная - 24 кэв. Для угла 110° и падении напряжения 30 кэв эффективная энергия равна 21 кэв, средняя -

24 кэв, после фильтра (2 мм алюминия) средняя энергия равна 27 кэв.

Для кенотрона типа КРМ-150 для угла 70° эффективная энергия нефильтрованного излучения при падении напряжения 17 кв равна 15 кэв; 18 кв - 15,5 кэв; 23 кв - 16 кэв; 27 кв - 17 кэв; 29 кв - 18 кэв; 55 кв - 31 кэв; для угла 140° при падении напряжения 50 кв эффективная энергия равна 37 кв, а средняя - 42 кэв.

Для кенотрона типа В1-0,03/13 для угла 50° при падении напряжения на кенотроне 12,8 кв средняя энергия равна 11,9 кэв; для кенотрона типа ИЦ1С при 15 кв средняя энергия равна 13,4 кэв.

Отметим несколько моментов, связанных с различными режимами работы кенотронов, определяющих формирование спектра рентгеновского излучения.

При работе кенотронов в нормальном режиме тормозное излучение образуется за счёт обратного тока. Максимальная энергия квантов в спектре в зависимости от схемы включения лампы будет в 1,05 - 3,1 раза больше, чем величина выпрямленного напряжения. Энергия квантов рентгеновского излучения зависит от конструкции кенотрона, свойств катода, от величины высокого напряжения и времени эксплуатации. Как было отмечено выше, новый, не бывший в работе кенотрон, после включения даёт большую мощность дозы, которая через некоторое время (5-15 мин.) уменьшается. Это явление можно объяснить временным ухудшением вакуума в баллоне. В результате прогрева поглотителя вакуум постепенно улучшается и уменьшается обратный ток. Если величина обратного тока при этом не превышает 10% выпрямленного тока, то жесткость спектра при этом практически мало изменяется. Отмечались случаи большой величины обратного тока (до 15% от прямого), тогда максимальная энергия квантов в спектре сдвигалась в сторону более низких энергий. Средняя энергия спектра тормозного излучения кенотронов очень сильно зависит от фильтрации. В эксперименте применялись фильтры из алюминия, дюрала, железа и меди. Эти материалы были выбраны потому, что из них обычно конструируют панели и защиту на высоковольтных и радиотехнических установках.

При работе кенотрона в режиме недокала катода основными

величинами, от которых зависит энергия квантов в спектре, энергетическая ширина спектра, присутствие в спектре характеристических линий и средняя энергия спектра будут: степень недокала катода, величина высокого напряжения и сопротивления нагрузки, время эксплуатации кенотрона, материал анода и конструкции лампы, а также атомный номер и толщина защиты, если таковая имеется.

Новые катоды имеют значительный запас тока эмиссии, по этому; при небольшом недокале (10-15%) рентгеновское излучение в течение 10-25 минут после включения не регистрируется. По истечении этого времени счётчик типа СРМ-1 начинает регистрировать рентгеновское излучение, выходящее из баллона кенотрона, максимальная энергия квантов в спектре которого постепенно сдвигается в сторону больших энергий.

Кенотроны с торированным катодом, проработавшие несколько сот часов в номинальном режиме, при включении с недокалом катода сразу генерирует излучение. При этом максимальная энергия квантов в тормозном спектре начинает перемещаться, примерно, через минуту в сторону больших энергий. Через 2-5 минут режим стабилизируется и перемещение заканчивается.

В эксперименте были установлены значительные колебания мощности дозы, регистрируемой приборами РП-1, МРМ-2 и "Кура", в то время как показания нормальной камеры практически не изменялись. Эти колебания как бы модулировали общий уровень нарастания мощности дозы. Подобные колебания наблюдались для всех кенотронов с металлоплёночными катодами при высоком напряжении более 30 кв. Если при этом применялись фильтры (2 мм Al), то амплитуда колебаний показаний приборов значительно уменьшалась. Так как интенсивность рентгеновского излучения остается приблизительно постоянной, то колебания показаний дозиметров можно объяснить изменением спектрального состава излучения.

Анализируя спектры рентгеновского излучения приходим к выводу.

1. Спектры рентгеновского излучения кенотронов - сложные. В спектрах рентгеновского излучения кенотронов с анодными электродами из молибдена количество характеристических квантов может доходить до 40%.

2. Ширина энергетического диапазона спектра зависит от падения напряжения на кенотроне и толщины баллона.

3. Имеется чётко выраженная угловая зависимость распределения интенсивностей рентгеновского излучения для большинства кенотронов при падении напряжения на кенотроне более 10 кв.

4. Минимальная энергия, начиная с которой кванты рентгеновского излучения начинают регистрироваться приборами, заключена в интервале 10-15 кэв и зависит от типа лампы.

5. Средняя энергия рентгеновского излучения при применении фильтров из железа и меди толщиной 0,5 мм будет всегда более 20 кэв, так как кванты с меньшей энергией практически все поглощаются.

6. Средняя энергия рентгеновского излучения кенотронов в зависимости от режима работы лампы может изменяться в широком диапазоне (10-40 кэв).

7. Характеристическое излучение из фильтра уменьшает среднюю энергию фильтрованного рентгеновского излучения приблизительно на 1-2 килоэлектронвольта.

8. Эффективная энергия рентгеновского излучения составляет приблизительно две третьих от максимальной, определяемой величиной падения напряжения на кенотроне при применении железных и медных фильтров толщиной 0,5 мм и половину без фильтров.

9. Средняя энергия рентгеновского излучения приближается к верхней граничной энергии в спектре, если падение напряжения на кенотроне не более 25 кв и примерно равна ей при напряжениях 10-15 кв.

10. Средняя энергия рентгеновского излучения кенотронов в зависимости от угла, под которым оно регистрируется, может изменяться на 5-10 кэв при одном и том же падении напряжения на лампе.

11. Средняя энергия, определенная из спектрального распределения, всегда больше средней энергии, определенной по ослаблению фильтрами.

§ 4. Работа кенотрона с давлением газа в баллоне

более 10^{-6} мм рт.ст.

Специальный эксперимент по ухудшению вакуума в баллонах кенотронов не ставился, так как при натекании воздуха в баллон происходит отравление катода. Поэтому выбирались кенотроны с плохим вакуумом, которые встречались на практике. Количество таких ламп было 5-15 каждого типа. Загазованность кенотрона определялась подачей высокого напряжения на кенотрон с выключенным накалом. По величине анодного тока (более паспортного в 3-5 раз) отбирались загазованные кенотроны. Если обнаруживалось свечение в кенотроне, то такой прибор считался сильно загазованным, амплитуда тока в нём достигала 1-10 ма при 15-30 кв.

Были выявлены кенотроны, у которых свечение не наступало до 20-40 кв, а затем при подаче более высокого напряжения, оно появлялось, при этом резко увеличивался обратный ток.

Низкий вакуум в лампе может образоваться во время изготовления, при длительном хранении, при повышенных режимах эксплуатации, а также при длительной эксплуатации прибора в нормальном режиме.

Исследование причин отказов электровакуумных приборов /10/ показало, что удельный вес отказов кенотронов среди других ламп составляет 3,5%. Из них отказы из-за трещин в баллоне, натекании и разрушения поколей составляют 17-28%. Ухудшение вакуума при работе связано с газовыделением из электродов и стекла баллонов. При 270°C наблюдается интенсивный электролиз стекла и резко возрастает выделение кислорода. Электронной бомбардировкой стекла разлагаются его компоненты, и за счёт разложения окиси натрия выделяется кислород /11/.

Давление газа в лампе в результате долгого хранения может падать до $2 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Работа прибора в дежурном режиме может увеличить давление газов на один, два порядка. Газ появляется в колбе за счёт разложения химических соединений, осевших на электродах и стенках баллона в процессе изготовления лампы /12/.

Амплитуда обратного тока у кенотронов с металлоплёночными катодами при первичном включении может достигать 0,1-1 ма при

номинальной нагрузке и 0,5 максимально-допустимого напряжения. Обратный ток растёт с ростом высокого напряжения и напряжения накала катода. При этом, в слабо загазованном кенотроне (нет свечения газа) величина обратного тока составляет приблизительно 3-5% от прямого в рекомендуемом режиме. Для сильно загазованного кенотрона (есть свечение газа) - 5-15%. У загазованного кенотрона увеличивается выход рентгеновского излучения в режиме недокала. В этом режиме электроны ускоряясь в промежутке катод-анод разогревают анод и стенки баллона, увеличивают выделение газа. Выделенный газ ионизируется электронами, в результате этого увеличивается обратный ток. Так, для одного из кенотронов типа КРМ-150 при 36 кв высокого напряжения и напряжении накала 9 в, амплитуда обратного тока равна 0,7 ма, прямого - 23 ма, а при 70 кв - амплитуда обратного тока равна 1,6 ма, прямого - 26 ма. При 70 кв и нормальном напряжении накала амплитуда обратного тока равна 0,6 ма.

Слабо загазованный кенотрон через 20-40 минут работы в режиме 0,3 - 0,5 номинального анодного напряжения может восстановиться. Амплитуда обратного тока уменьшается до величины паспортного значения. В результате этого уменьшится выход рентгеновского излучения. После такой тренировки кенотрон можно эксплуатировать в номинальном режиме. Сильно загазованные кенотроны после тренировки не восстанавливаются.

Если кенотроны работают при одинаковом высоком напряжении, то максимальный выход рентгеновского излучения загазованного кенотрона составляет приблизительно 0,2-1,0 от максимального выхода рентгеновского излучения при недокале катода. Средняя энергия рентгеновского излучения в режиме загазованности примерно 1,2-1,5 раз больше средней энергии в режиме недокала катода.

Кенотрон типа КРМ-150 с параметрами, соответствующими паспортным данным, эксплуатировался в течение 100 часов в режиме недокала катода при 40 кв высокого напряжения. Амплитуда обратного тока при этом увеличилась с 50 мка до 0,3 мка. Мощность дозы увеличилась с 20 мр/час.м до 230 мр/час.м., при этом изменилась форма осциллограммы обратного тока.

Обратный ток исправного кенотрона увеличивается при недокале катода приблизительно в 2-3 раза, а загазованного может

увеличиваться в 10-15 раз, в зависимости от величины обратного напряжения и сопротивления нагрузки. У сильно загазованного кенотрона с увеличением обратного напряжения форма осциллограммы обратного тока приближается к синусоиде. Время, в течение которого происходят указанные процессы, заключено в интервале от десятков секунд до 2-5 минут.

Увеличение обратного тока кенотрона при недокале катода объясняется разогревом ускоренными электронами деталей конструкции лампы и выделением из них в результате этого газов, повышенным электролизом стекла и увеличением ионизации газа, отраженными от анода электронами.

Количество загазованных кенотронов с металлопленочными катодами значительно меньше, чем кенотронов с оксидными катодами. Кенотроны с оксидными катодами, хранящиеся на складе более 5 лет практически все являются загазованными. Испытывались четыре партии различных кенотронов по 10-15 экземпляров одного типа со сроком хранения от 5 до 10 лет. Около 20% (почти все хранились около 5 лет) после тренировки при пониженном высоком напряжении и максимальном по паспорту анодном токе восстановили работоспособность.

Зависимость амплитуды обратного тока от амплитуды высокого напряжения особенно сказывается у кенотронов с оксидными катодами. Так для кенотрона типа В1-0,03/13 получены следующие данные:

- при 4 кв - 100 мка
- при 10 кв - 2,2 ма
- при 13 кв - 5 ма (сопротивление нагрузки 280ком)
- при 13 кв - 1,9 ма (сопротивление нагрузки 860ком)

Изменение формы осциллограммы обратного тока для кенотрона типа В1-0,03/13 дано на рис.29.

Как было сказано выше, режим недокала оксидного катода не представляет большой радиационной опасности, т.к. кенотрон с оксидным катодом не имеет тока насыщения. Но необходимо отметить, что с увеличением недокала оксидного катода значительно увеличивается обратный ток. Например, для кенотрона типа В1-0,03/13 имеем:

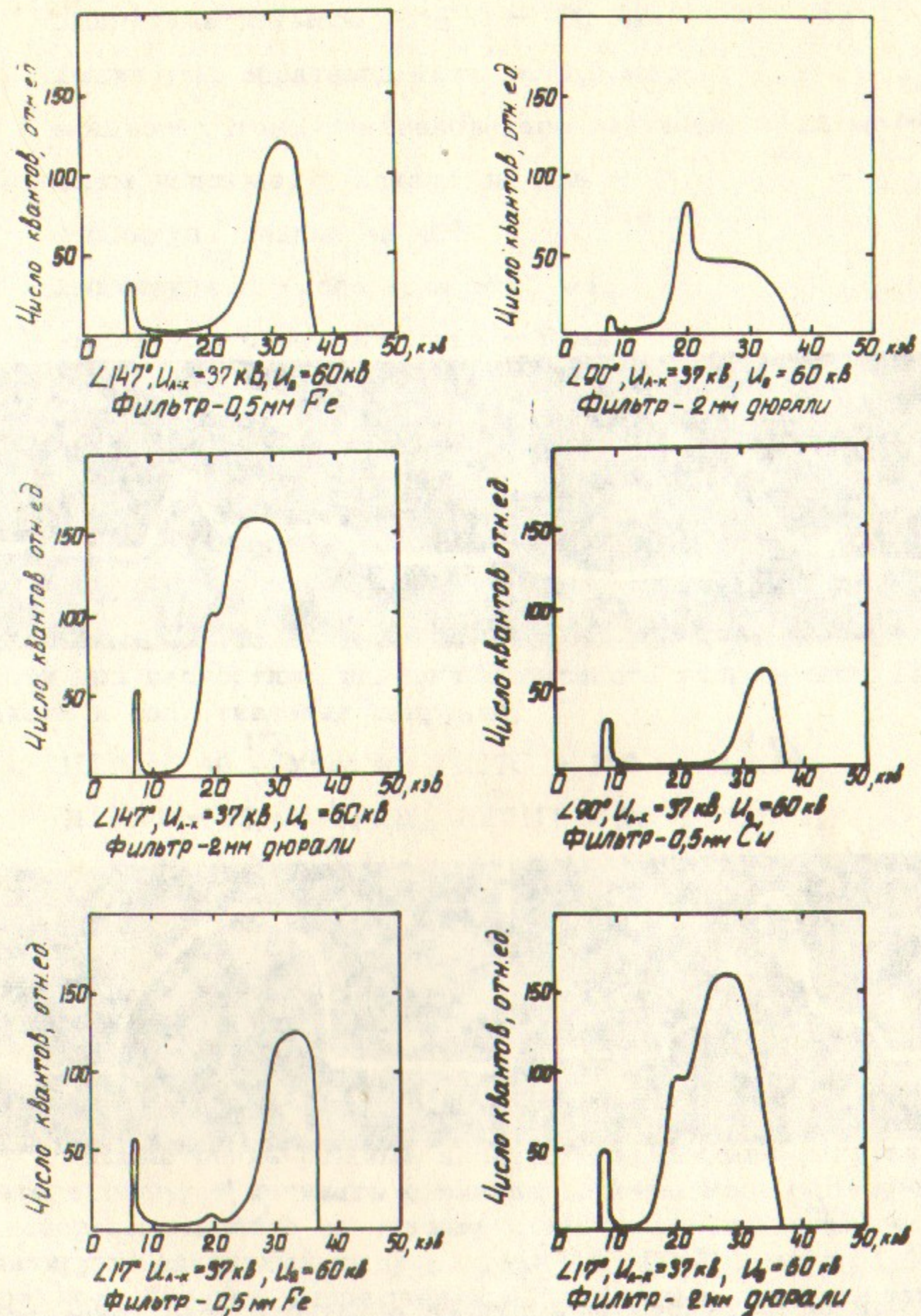
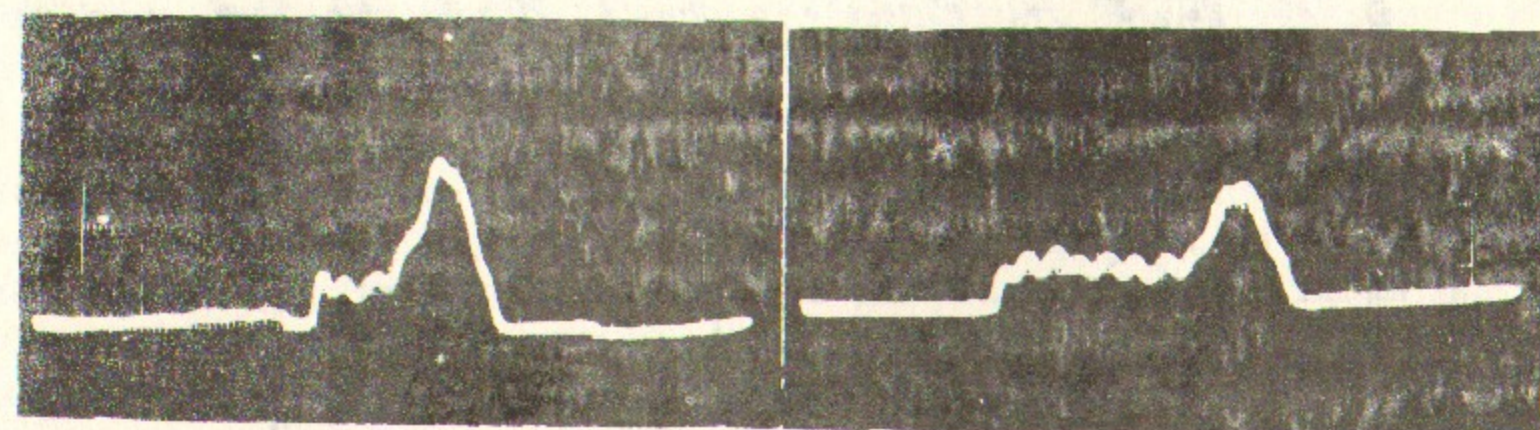
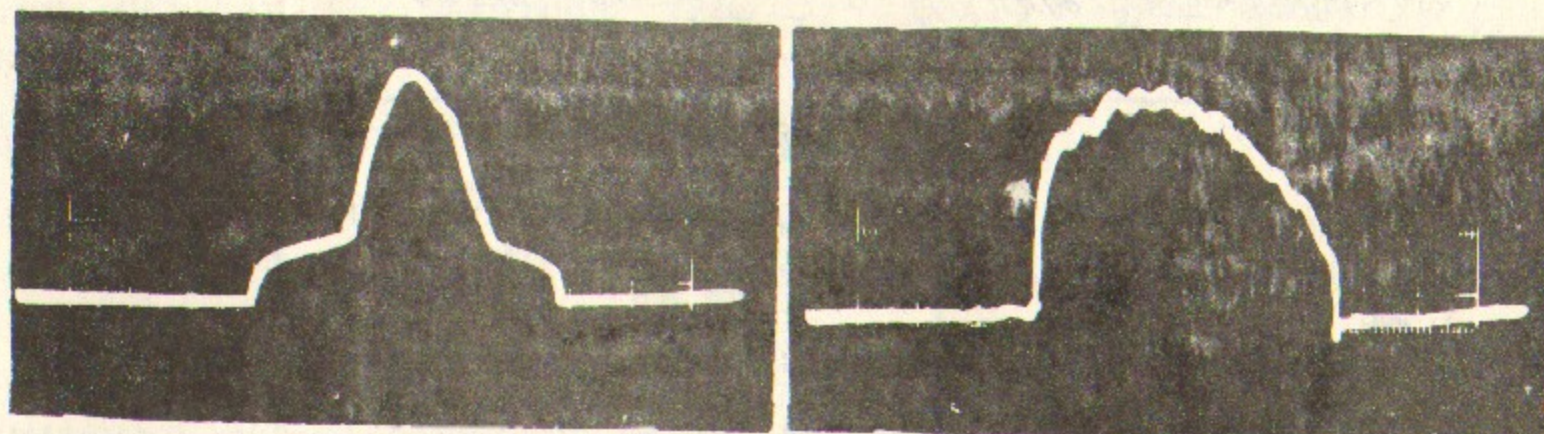


Рис.28. Спектры фильтрованного рентгеновского излучения кенотрона типа КРМ-110.



а)

б)



в)

г)

Рис.29. Зависимость формы импульса обратного тока кенотрона В1-0,03/13 от величины обратного напряжения: а) 4 кв, 100 мка; б) 8 кв, 1,5 ма; в) 10 кв, 2,2 ма; г) 13 кв, 5 ма.

амплитуда прямого тока - 50 ма;

амплитуда обратного тока - 1,0 ма;

мощность дозы рентгеновского излучения - 25 мр/час.м.

Уменьшим напряжение накала на 40% -

амплитуда накала на 40%

амплитуда прямого тока - 45 ма;

амплитуда обратного тока - 5 ма;

мощность дозы рентгеновского излучения - 180 мр/час.м.

Обратный ток у кенотрона с оксидным катодом в процессе эксплуатации растёт, так как понижается работа выхода электронов из анода, за счёт испарения вещества катода и оседания его на аноде.

Ниже даны максимальные мощности доз рентгеновского излучения кенотронов с оксидными катодами в режиме загазованности при паспортных значениях высокого напряжения, напряжения накала и сопротивления нагрузки.

1Ц1С - 40 мр/час.м; 1Ц7С - 180 мр/час.м;

1Ц11П - 15 мр/час.м; 1Ц21П - 20 мр/час.м;

1Ц21ПК - 0 мр/час.м; 2Ц2С - 10 мр/час.м;

3Ц16С - 200 мр/час.м; 3Ц18П - 80 мр/час.м;

В1-0,03/13 - 230 мр/час.м.

§ 5. Короткое замыкание нагрузки выпрямителя

Рассмотрение режима короткого замыкания нагрузки выпрямителя следует начинать с оценки токовых возможностей вентиля. Паспортные данные кенотронов с металлоплёночными катодами гарантируют начальный импульс тока до 100-800 ма за 0,1-1 секунду. Среднее значение выпрямленного тока новых ламп составляет около 20-150 ма при напряжении на промежутке катод-анод около 3 кв. Если для оценки предположить, что выпрямитель проектируется с двойным запасом по номинальной мощности, то в режиме

короткого замыкания на кенотроне будет выделяться удвоенная номинальная мощность. Практически трансформаторы конструируются в расчёте на средние мощности с некоторым запасом. Поэтому мощность разделится между кенотронами и вторичной обмоткой трансформатора и на кенотроне будет напряжение значительно меньше номинального. Если ток эмиссии катода кенотрона больше максимального возможного тока (ток короткого замыкания) вторичной обмотки, то на ней будет падать значительная часть высокого напряжения в режиме короткого замыкания, за исключением 4-10 кв, которые будут приложены к кенотрону.

Кенотроны с оксидными катодами не имеют тока насыщения, поэтому в режиме короткого замыкания нагрузки на них будет падать очень небольшая часть высокого напряжения (1-2 кв). Кроме того, кенотроны с оксидными катодами применяются, как правило, в выпрямительных устройствах с номинальной мощностью приблизительно 0,1-1 квт, токи короткого замыкания которых во много раз меньше анодных токов кенотронов. Поэтому в режиме короткого замыкания нагрузки выпрямителя на кенотронах с оксидными катодами радиационной опасности практически не представляют.

В экспериментах по короткому замыканию нагрузки выпрямителя время короткого замыкания измерялось по количеству импульсов, зарегистрированных пересчётным прибором ПСТ-100. Вход ПСТ-100 подключался к одной из клемм электромагнитного пускателя, через который запитывалась первичная обмотка высоковольтного трансформатора. Падение высокого напряжения на кенотроне измерялось прибором С-100. Амплитуда и форма импульса тока короткого замыкания выпрямителя определялись на осциллографе С-1-8. Опыты проводились на трёх генераторных устройствах с номинальными мощностями 3 квт, 5 квт и 10 квт.

Регистрация мощностей доз осуществлялась в 10 точках под различными углами дозиметрами КИД-2, ИФК-2,3 и ТДП-2, которые предварительно были градуированы по нормальной камере. Источниками излучения при градуировке служили высоковольтные кенотроны в режиме недокала катода.

Короткое замыкание нагрузки выпрямителя с кенотронами типов 1Ц1С, 1Ц7С, 1Ц11П, 1Ц21П, 2Ц2С, 3Ц16С, 3Ц18П и В1-0,03/13 подтвердило первоначальные предположения. Падение

напряжения на кенотронах не превышало приблизительно 1 кв. Время работы выпрямителя в режиме короткого замыкания составляло 10-16 секунд. На выпрямитель подавалось максимальное высокое напряжение, характерное для каждого типа кенотронов. Мощность доз от указанных кенотронов практически равнялась нулю.

Результаты экспериментов с кенотронами, имеющими металлоплёночные катоды, даны в таблице 4.

Нарастание высокого напряжения на новом кенотроне происходит приблизительно в течение 2-5 секунд. Если кенотрон был в эксплуатации несколько сотен часов, то нарастание напряжения происходит практически мгновенно. Падение напряжения на новом кенотроне всегда меньше, чем на старом. Эффективная энергия рентгеновского излучения нового кенотрона на 2-10 кв ниже эффективной энергии излучения старого, определенная по ослаблению в алюминиевых фильтрах при напряжениях не более 60 кв.

Короткое замыкание нагрузки выпрямителя в момент включения менее радиационно-опасно, чем замыкание нагрузки уже работающего. Так как катод кенотрона даёт большую эмиссию в момент включения, то пройдет 2-5 секунд прежде чем на кенотроне упадёт значительное напряжение, и оператор за это время может выключить установку. При коротком замыкании нагрузки работающего выпрямителя переходные процессы происходят практически мгновенно, так как ток эмиссии работающего кенотрона меньше, и оператор, как правило, нацелен в этот момент на другие задачи.

Исследовался режим короткого замыкания нагрузки выпрямителя при недокале катода кенотрона. В этом случае мощность генераторного устройства не играет большой роли, т.к. внутреннее сопротивление будет сотни килоом или несколько мегом, в зависимости от величины недокала. Падение напряжения на кенотроне достигает 0,7 - 0,9 напряжения вторичной обмотки. Выход рентгеновского излучения достигает 0,5-0,8 выхода рентгеновского излучения при коротком замыкании нагрузки без недокала. При небольших недокалах катода через 5-15 секунд катод кенотрона разогревается проходящим через него током и режим недокала катода переходит в режим короткого замыкания.

В режиме короткого замыкания нагрузки загазованных кенотронов с оксидными катодами марки В1-0,03/13 регистрировались мощности доз до 2-5 мр/сек.м. Увеличение мощности дозы почти

Таблица 4

Выход рентгеновского излучения в режиме короткого замыкания нагрузки

Тип лампы	Подаваемое высокое напряжение (кв)	Падение напряжения на лампе (кв)	Максим. мощность дозы (р/сек.м.)	Угол, соотв. максимальной мощности дозы	Мощность генерат. устройства (квт)
1	2	3	4	5	6
КРМ-150	40	21	0,110	70°	3
—	50	23	0,140	70°	3
—	40	28	0,850	70°	5
—	50	35	3,0	70°	5
—	50	40	8,9	70°	10
КРМ-110	40	33	0,05	40°	3
—	50	35	0,07	40°	3
—	50	41	0,3	40°	5
—	50	45	2,4	40°	10
КРМ-80	40	18	0,09	80°	3
—	50	20	0,13	80°	3
—	50	29	1,2	80°	5
—	50	38	8,6	80°	10
В1-0,15/55	40	15	0,005	10°	3
—	40	22	0,28	10°	5
—	40	29	2,9	10°	10

1	2	3	4	5	6
В1-0,1/40	40	15	0,002	10°	3
—	40	24	0,13	10°	5
—	40	32	0,95	10°	10
В1-0,1/30	29	23	0,0007	10°	3
—	29	25	0,004	10°	5
—	29	27	0,6	10°	10
В1-0,1/20	20	18	0,0005	10°	3

на два порядка по сравнению с режимом загазованности, когда имеется нагрузка, можно объяснить значительным напылением вещества катода на аноде и нагреванием анода большими токами короткого замыкания.

Мощность доз загазованных кенотронов с металлопленочными катодами в режиме короткого замыкания нагрузки увеличились приблизительно в 1,2 - 2 раза по сравнению с режимом, когда имелась нагрузка. Высокое напряжение подавалось на кенотрон в обоих случаях одинаковым.

§ 6. Анализ электрических схем и рекомендации по эксплуатации высоковольтных выпрямителей

Рассмотрим работу m_{11} -фазного выпрямителя. В нормальном режиме токовая нагрузка распределена равномерно на n кенотронов ($n = m_{11}, 2m_{11}, 3m_{11}$). Допустим, что один кенотрон потерял эмиссию. Работа однофазного выпрямителя ($m_{11} = 1$) рассмотрена нами ранее (вариант А). Пусть $m_{11} = 2; 3...$ В этом случае время генерации кенотроном рентгеновского излучения за один период будет в 2, 3... раза меньше, чем для $m_{11} = 1$. Уменьшение напряжения на нагрузке будет компенсировано повышением напряжения питания устройства (вариант В). А это в свою очередь увеличит падение напряжения на неисправном кенотроне. Ёмкостная

нагрузка уменьшает, а индуктивная увеличивает падение напряжения на кенотроне в режиме недокала.

Работа загазованного кенотрона в однофазной схеме с ёмкостной нагрузкой и в схеме с $m_{н} > 1$ (вариант С) связана с большим выходом рентгеновского излучения. Так как обратное напряжение для однофазной схемы складывается из амплитудного напряжения вторичной обмотки и напряжения на ёмкости, а для $m_{н} > 1$ — из напряжения на вторичных обмотках загазованного и пропускающего кенотрона. Нагрузкой для обратного тока загазованных кенотронов будет активное сопротивление этих обмоток. На выход рентгеновского излучения загазованного кенотрона, включенного в схему с $m_{н} > 1$, характер нагрузки сказываться не будет.

Выход рентгеновского излучения для $m_{н} > 1$ -фазной схемы в режиме короткого замыкания пропорционален числу фаз.

Рассмотрим схемы с последовательным соединением кенотронов в фазе. Характер падения напряжения на кенотроне и выход рентгеновского излучения в режиме недокала одного кенотрона подобен описанным выше (вариант А). Работа выпрямителя с загазованным кенотроном подобна работе, описанной в варианте В. В режиме короткого замыкания нагрузки выпрямителя высокое напряжение перераспределяется между кенотронами и вторичной обмоткой. Влияние вторичной обмотки на перераспределение напряжений ранее рассматривалось. Пусть кенотроны имеют одинаковые параметры, тогда падение напряжения на каждом $\Delta U = \frac{U_в - U_{г.у.}}{n}$, где $U_в$ — расчётное напряжение выпрямителя; $U_{г.у.}$ — падение напряжения на обмотке; n — число кенотронов в цепи фазы. Если параметры не одинаковы, то падение напряжения на кенотроне, имеющем большее внутреннее сопротивление, будет приближаться к $U_в - U_{г.у.}$, в зависимости от соотношений внутренних сопротивлений кенотронов в фазе.

Схемы умножения напряжения менее радиационно опасны, т.к. возможное падение напряжения на одном кенотроне в k раз (коэффициент умножения) меньше напряжения на нагрузке. При падении напряжения (ΔU) на n -ом кенотроне, где ($n = 1, 2 \dots$), выходное напряжение уменьшится на $\Delta U \cdot \frac{k}{n}$.

Наиболее часто для стабилизации высокого напряжения ис-

пользуют схемы с обратной связью из цепи высоковольтного выпрямителя в цепь питаемого напряжения /13,14/. Данная схема стабилизации высокого напряжения осуществляет стабилизацию от возможных изменений параметров звеньев, охваченных обратной связью. Будь то изменение напряжения питающей сети, увеличение загрузки трансформатора или увеличенное падение напряжения на кенотронах. Поэтому кенотрон с ухудшенными параметрами будет генерировать рентгеновское излучение до тех пор, пока изменение его параметров, не скажется на величине выходного напряжения.

Потребляемая мощность выпрямительным устройством увеличивается при коротком замыкании сопротивления нагрузки и при загазованности кенотронов. Ограничение потребляемой мощности достигается включением перегрузочного сопротивления (5-10 ом) в первую цепь или ограничительного сопротивления (10% от сопротивления нагрузки) в высоковольтную цепь.

Наиболее часто ограничение потребляемой мощности реализуется отключением выпрямительного устройства от питающей сети (плавкие предохранители, реле максимального тока и различные автоматы). Время срабатывания плавких предохранителей составляет приблизительно 10 сек. при двухкратной перегрузке и 0,2 сек. при коротком замыкании /15/. Время срабатывания реле максимального тока типа РМА при 2-3 кратной перегрузке — 0,06 сек., а при 10-кратной — 0,01 сек. Время срабатывания автоматов типа АЗ приблизительно — 0,02 сек. Автомат типа С-11 применяется в цепях высокого напряжения. Его время срабатывания — 0,04 сек. Таким образом, применение автоматического отключения выпрямительного устройства значительно снижает облучение персонала в аварийных режимах.

При эксплуатации высоковольтных выпрямителей желательно иметь стабилизатор тока накала катода кенотрона или регуляторы тока накала, основанные на положительной обратной связи по анодному току /16/.

Токовую стабилизацию в высоковольтной цепи можно осуществить применяя измерительный мост на кремниевых стабилитронах /17/ с поляризованным реле в диагонали. Исполнительное реле отключает высоковольтный выпрямитель от сети как в режиме недокала катода и загазованности баллона кенотрона, так и при коротком замыкании сопротивления нагрузки.

Применяя дозиметрические приборы (РП-1, "Кактус" с камерой из целлюлозы и т.д.) с целью отключения высоковольтного устройства при превышении заданного уровня интенсивности рентгеновского излучения, одновременно узнают и о мощности дозы ионизирующего излучения на определенном расстоянии от выпрямителя. Для уменьшения времени отключения в дозиметрическом приборе желательно применять интегрирующие цепи с малой постоянной времени.

Среднее значение тока, на которое рассчитываются выпрямительные приборы, обычно составляет одну треть амплитудного /18/. При использовании вентилях в зарядных режимах это соотношение может значительно превышать указанное значение. В результате этого кенотроны через некоторое время эксплуатации становятся мощными источниками рентгеновского излучения.

Частные технические условия (ЧТУ) рекомендуют для обеспечения повышенной эксплуатационной надежности снижать напряжение питания накала катода на 25-30% ниже номинального /19/, что приведет к значительному выходу рентгеновского излучения из кенотрона, по существу уже находящегося в режиме недокала катода. Особенно недокал скажется на кенотронах с металлопленочными катодами.

Рекомендуется, по возможности, применять в высоковольтных выпрямителях кенотроны с оксидными катодами или высоковольтные полупроводниковые выпрямители.

Все высоковольтные выпрямители обязательно должны иметь защиту от возможного рентгеновского излучения. Защита проектируется с учетом максимального высокого напряжения и типа выпрямительного прибора. Материал для защиты и его толщины выбираются по таблицам, приведенным в "Санитарных правилах работы с источниками мягких рентгеновских лучей" № 756-68.

В заключение авторы приносят благодарность за помощь в эксперименте и оформлении графического материала Я.Я.Медикову.

Л и т е р а т у р а

1. Р.Егер. Дозиметрия ионизирующих излучений. Госатомиздат, (1961), стр.108.
2. Л.А.Дудник. Испытания электронных ламп. Изд. "Сов.радио", М., (1958).
3. Б.Н.Никитин и др. "Радиотехника и электроника" 3, 8, 1043 (1958).
4. В.И.Гапонов. Электроника. Часть 1, Физматгиз. М., (1960).
5. Бета и гамма-спектроскопия. Под ред.К.Зигбана. Физматиздат. М., (1959), стр.176.
6. В.Кмент, А.Кун. Техника измерения радиоактивных излучений. Наука, М., (1964), стр.124.
7. Приборы для регистрации ядерных излучений и их применение. Под ред. А.Снейла. Атомиздат, (1965), стр.62.
8. Альфа-бета-и гамма спектроскопия. Под ред.К.Зигбана. Вып.1. Атомиздат. М., (1969), стр.332.
9. Е.Л.Столярова. Прикладная спектрометрия ионизирующих излучений. Атомиздат, М., (1964).
10. А.М.Широков. Основы надежности и эксплуатации электронной аппаратуры. "Наука и техника", Минск (1965).
11. Остаточные газы в электронных лампах. Материалы первого международного симпозиума. Пер.с английского. Под ред. Г.Д.Глебова, М.,-Л., (1965).
12. Г.Д.Глебов. Поглощение газов активными металлами. Госэнергоиздат, М.,-Л., (1961).
13. А.М.Козодаев, Н.В.Лазарев. "ПТЭ" (1970), № 4, стр.92-94.
14. Н.И.Светлов. Маломощные высоковольтные источники высокого напряжения. Госэнергоиздат. М.-Л., (1962).
15. Г.С.Векслер, Я.И.Тетельбаум. Электропитание радиоустройств. Изд. "Техника", Киев (1966).
16. Р.Чепмен "Приборы для научных исследований", (1966), № 8, стр.145.

17. В.С.Кулебакин и др. Полупроводники в автоматике. Изд. АН СССР, М., (1963).
18. В.П.Черепанов, О.П.Григорьев. Вакуумные и газоразрядные вентили. Изд. "Сов.радио", М., (1969).
19. М.М.Погорельский, Б.А.Подъяпольский. Импульсные кенотроны. Изд. "Сов.радио", М., (1969).

Ответственный за выпуск Г.М.Протопопова
Подписано к печати 25.06.77. МНО2694
Усл. 2,9 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.
Заказ № 28 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротационной машине в ИЯФ СО АН СССР, нв.