

Г. 83

препринт

136

В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова

**Радиационная опасность  
высоковольтных кенотронов**

г.Новосибирск 1967

## А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассмотрены режимы, при которых высоковольтный кенотрон может представлять радиационную опасность. Приведены расчетные и экспериментальные мощности доз рентгеновского излучения для этих режимов.

## I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При работе высоковольтных кенотронов в нормальном режиме накал катода и анодное напряжение соответствуют паспортным данным, сопротивление нагрузки обычно несколько мегом. Падение напряжения на промежутке катод-анод несколько сотен вольт.

При положительном полупериоде электроны, испускаемые катодом, летят на анод и, отдавая ему свою энергию, незначительно (сотни градусов) разогревают его. При отрицательном полупериоде кенотрон заперт.

Этот режим работы кенотрона не представляет радиационной опасности. Однако в ряде случаев падение напряжения на кенотроне может быть значительным, тогда при торможении электронов на электродах возникает рентгеновское излучение /I/.

Рассмотрим эти случаи более подробно. При недокале катода увеличивается внутреннее сопротивление кенотрона, падение напряжения на промежутке анод-катод может достигнуть большой величины, вплоть до полного приложенного. Электроны, испускаемые катодом, ускоряются этим напряжением и при торможении в материале анода возникает рентгеновское излучение. Анод при этом может разогреваться настолько, что заметно возрастает эмиссия с его поверхности. При обратном полупериоде электроны, эмитируемые анодом, будут тормозиться на катоде, образуя рентгеновское излучение и разогревая катод. Недокал компенсируется, уменьшается падение напряжения на промежутке анод-катод, разогрев анода прекращается, а значит и дополнительный разогрев катода исчезает, что приводит опять к недокалу катода. В конце-концов, между этими процессами устанавливается динамическое равновесие.

Действительно, при проведении эксперимента с кенотроном в режиме недокала катода, вначале наблюдается всплеск интенсивности рентгеновского излучения, затем уменьшение, и последующее возрастание до какой-то постоянной величины. Если недокал катода уменьшать постепенно, то интенсивность и жесткость рентгеновского излучения будет постепенно увеличиваться. Затем интенсивность, достигнув максимума, начнет уменьшаться, т.к. катод будет эмитировать все меньше и меньше электронов.

Время генерирования кенотроном рентгеновского излучения в режиме недокала катода ограничивается термостойкостью анода и может быть значительным (часы) в зависимости от величины недокала.

Были проведены замеры выхода рентгеновского излучения от кенотронов типа КРМ-150 в режиме недокала катода, в режиме короткого замыкания и загазованности кенотрона.

Для дозиметрии был выбран в качестве основного метод ИФК-2,3М /2/. Для грубого контроля мощностей доз во время эксперимента использовались приборы "Кура" и "ПМР-1", которые в интересующей нас области энергий рентгеновского излучения имеют ход с жесткостью. Поэтому показания этих приборов являются значительно заниженными.

Для проведения опытов использовались стандартные рентгеновские выпрямители ТВН-320 (ВС-110-20) и ВС-50-50.

## 2. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### а) Режим недокала катода кенотрона

Проведем оценочный расчет выхода излучения для выпрямителя ТВН-320 с одним кенотроном с параметрами:  $U = 110$  кв;  $I_0 = 20$  ма;  $R_n = 5,5$  мом в режиме недокала катода.

Пусть в результате недокала катода выпрямленный ток  $I_0 = 10$  ма, тогда  $U_{R_n} = 5,5 \text{ мом} \cdot 10 \text{ ма} = 55$  кв;  $U_{A-K} = 55$  кв; анод кенотрона молибденовый  $Z = 42$ . Во всех расчетах фильтрация излучения стенками баллона не учитывается.

Воспользуемся формулой для лучевой отдачи рентгеновской трубки /3/

$$\eta = \frac{I_{\text{ТОР}}}{I_0 \cdot U_{A-K}} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot U_{A-K}^{0,75};$$

где  $Z$  - порядковый номер вещества анода в периодической системе;  
 $U_{A-K}$  - падение напряжения на промежутке анод-катод в кв;

$I_{\text{в}}$  - ток через кенотрон в ма

$\gamma_{\text{тор}}$  - интенсивность тормозного излучения

$$\eta = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 42.55^{0,75} = 2,55 \cdot 10^{-3}$$

$$\gamma_{\text{тор}} = I_{\text{в}} \cdot U_{A-K} \cdot \eta = 10.55 \cdot 2,55 \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ (эрг/сек)}.$$

Если считать, что угловое распределение излучения изотропно, то на расстоянии  $1\text{м}$  мощность дозы

$$P = \frac{\gamma_{\text{тор}} \cdot \gamma}{4\pi \cdot R^2 \cdot 0,114} = \frac{1,4 \cdot 10^7 \cdot 18 \cdot 10^{-5}}{12,56 \cdot 10^4 \cdot 0,114} = 0,2 \text{ (р/сек)}$$

где

$R$  - расстояние в см.

$\gamma$  - коэффициент электронного преобразования.

При эксперименте в режиме недокала катода получены следующие результаты:

I. Выпрямитель ВС-50-50, высокое напряжение 50 кв, кенотроны КРМ-150, напряжение накала по паспорту 13в, электрическая схема мостовая (рис. I).  $R_H = 1$  мом.

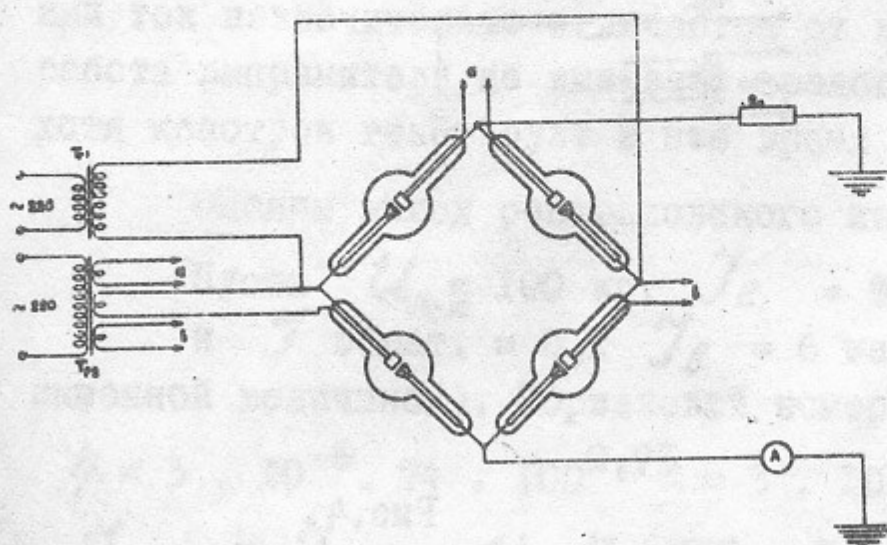


Рис. I

Напряжение накала изменялось от 5,5в до 12в. Результаты дозиметрических измерений приведены на рис. 9. Сплошной кривой показаны мощности доз, полученные методом ИФК-3М, показания приборов "Кура" и "ПМР-1" нанесены пунктирными кривыми для сравнения. Все мощности доз даны на расстоянии  $1\text{м}$  от геометрического центра выпрямителя в плоскости рас-

положения кенотронов. Эффективная энергия рентгеновского излучения в этом опыте заключена в диапазоне 10-14 кэв.

На рис.2 дан график зависимости величины падения напряжения на одном кенотроне от напряжения на кала катода. График строился на основании замеренных величин выпрямленного тока и сопротивления нагрузки. Максимальное падение напряжения на одном кенотроне не более 25 кв.

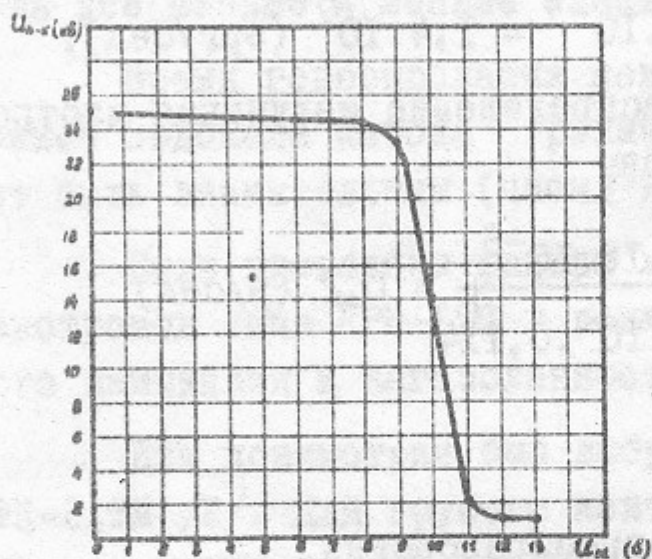


Рис.2.

2. Выпрямитель ТВН-320, высокое напряжение 110 кв, кенотроны КРМ-150. Схема опыта такая-же, как и в предыдущем опыте. Дозиметрические данные приведены на рис.10. Эффективная энергия рентгеновского излучения заключена в интервале 11-20 кэв.

Максимальное падение напряжения на одном кенотроне (рис.3) не более 55 кв.

3. Выпрямитель ТВН-320, высокое напряжение 110 кв, кенотрон КРМ-150, электрическая схема на рис.4.

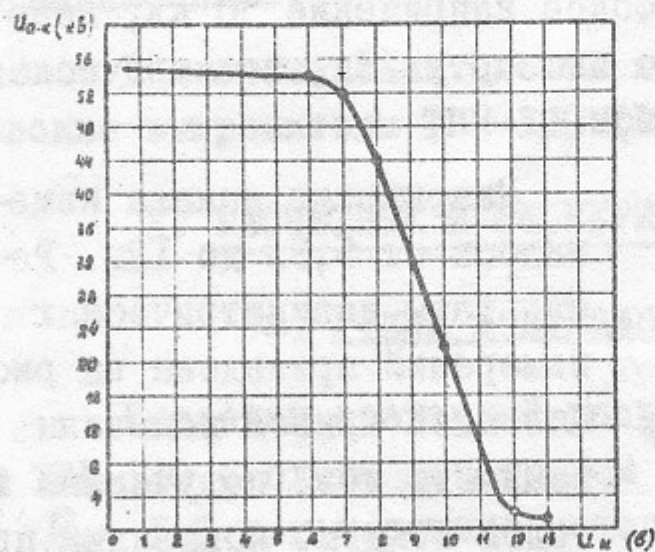


Рис.3.

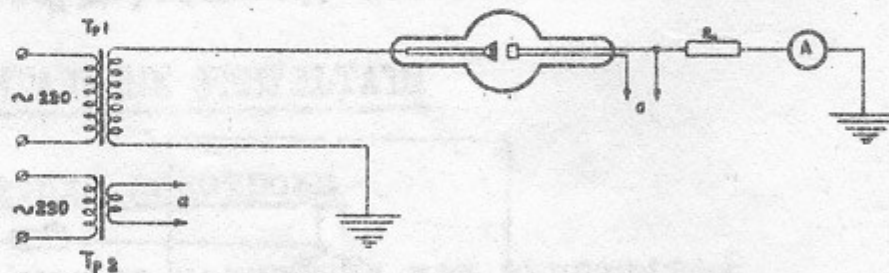


Рис.4.

Дозиметрические данные приведены на рис.11.

Эффективная энергия рентгеновского излучения заключена в диапазоне 11-34 кэв.

На рис.5 дан график зависимости величины падения напряжения на кенотроне от напряжения накала. Максимальное падение на -  
пряжения на кенотроне не более 110 кв.

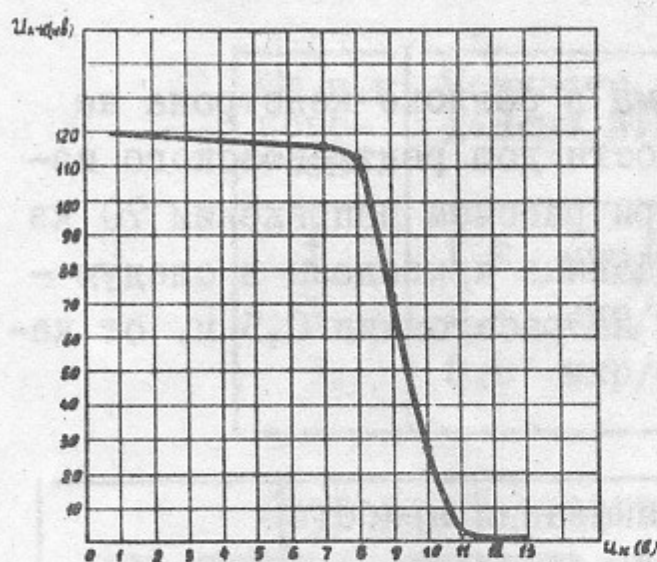


Рис.5.

Из анализа кривых на рис.2,3,5, 9,10 и 11 видно, что при уменьшении напряжения накала катода кенотрона на 2-3 вольта, между анодом и катодом кенотрона приложена большая часть высокого напряжения выпрямителя и кенотрон генерирует мощное рентгеновское излучение.

### б) Режим загазованности кенотрона

В результате длительной эксплуатации кенотрона из-за гажения стенок баллона, катода, анода, металлических вводов происходит нарушение вакуума, при котором еще возможна работа кенотрона как выпрямителя. Прохождение электронов от катода к аноду сопровождается ионизацией, в результате которой образуются электроны и положительно заряженные ионы. Электроны устремляются к аноду, увеличивая анодный ток, разогревают анод, а ионы бомбардируют катод.

При отрицательном полупериоде напряжения вследствие ионизации и разогрева анода в кенотроне течет обратный ток. На нагрузке происходит сложение токов прямого и обратного. Если суммарный ток незначительно отличается от нормального выпрямленного, то работа выпрямителя не вызывает тревоги у обслуживающего персонала, хотя кенотрон генерирует в это время рентгеновское излучение.

Оценим выход рентгеновского излучения в этом случае.

Пусть  $U_{а-к} = 100$  кв.  $I_{в.} = 60$  ма

и  $I_{обрат.} = 0,1 I_{в.} = 6$  ма (что является несколько завышенной величиной). Порядковый номер вольфрама  $Z = 74$ , тогда

$$\eta = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 74 \cdot 100^{0,75} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 74 \cdot 31,5 = 7 \cdot 10^{-3}$$

$$I_{тор} = I_{обр} \cdot U_{а-к} \cdot \eta = 600 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 4,2 \text{ (вт)} = 4,2 \cdot 10^7 \text{ (эрг/сек)}$$

Если считать, что излучение изотропно в угле  $4\pi$ , то на

расстоянии 1 м мощность дозы:

$$P = \frac{4,2 \cdot 10^7 \cdot 8 \cdot 10^{-5}}{12,56 \cdot 0,114 \cdot 10^4} \approx 0,5 \text{ (р/сек)}$$

Опыт по специальному ухудшению вакуума в баллоне кенотрона не ставился. Были проведены замеры мощности доз рентгеновского излучения от кенотронов типа КРМ-150 при рабочем напряжении 70 кв после длительной работы кенотронов. Данные приведены в следующей таблице. Дозиметры располагались на расстоянии 0,5 м. от кенотрона.

№ № п.п кенотронов	Время работы	Мощности доз по данным ИФК-2,3м	Показания прибора "Кура"	E эф.
1.	100 часов	3,1 мкр/сек	0,4 мкр/сек	23 кэв
2.	100 --"	3,3 мкр/сек	0,5 мкр/сек	20 кэв
3.	100 --"	6 мкр/сек	0,6 мкр/сек	18 кэф
4.	150 --"	8 мкр/сек	0,7 мкр/сек	14 кэв
5.	200 --"	6 мкр/сек	1,3 мкр/сек	18 кэв
6.	370 --"	9 мкр/сек	1,4 мкр/сек	15 кэв

Через 100 часов работы после первого измерения мощности доз от четырех первых кенотронов были вновь измерены прибором "Кура" и получены следующие данные:

№ № п.п кенотронов	Первое измерение	Второе измерение
1.	0,4 мкр/сек	0,6 мкр/сек
2.	0,5 мкр/сек	0,6 мкр/сек
3.	0,6 мкр/сек	1,6 мкр/сек
4.	0,7 мкр/сек	2,4 мкр/сек



На трех разных (по времени работы) кенотронах КРМ-80 при рабочем напряжении 35 кв на расстоянии 0,6 м от кенотрона получены следующие мощности доз:

№ п.п кенотронов	Мощности доз по данным ИФК-2,3М	Е эф.	Время работы
1.	1,8 мкр/сек	16 кэв	новый
2.	0,4 мкр/сек	9 кэв	40 часов
3.	0,8 мкр/сек	8,8 кэв	150 часов

Даже новый кенотрон может давать значительные мощности доз, видимо, также за счет загазованности.

### в) Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания длится от долей секунды до нескольких секунд, в зависимости от наличия в схеме реле перегрузки, предохранителей, автоматов и других особенностей.

Оценим выход рентгеновского излучения в этом случае для кенотрона КРМ-150. Выпрямленный ток будет равен току насыщения кенотрона. В обычных рентгеновских кенотронах ток насыщения наступает при напряжении 1-3 кв (ГОСТ 6919-54 и статическая характеристика на рис.6.).

Ток насыщения для КРМ-150 можно считать  $\sim 320$  ма. Внутреннее сопротивление кенотрона будет велико (сотни килоом), а сопротивление вторичной обмотки трансформатора в 10 или более раз меньше (зависит от конструкции трансформатора), и, практически, все вторичное напряжение будет падать на кенотроне.

Тогда для выпрямителя ТВН-320 с одним кенотроном  
 $I_{\text{в}} = 320$  ма;  $U_{\text{а-к}} = 100$  кв.

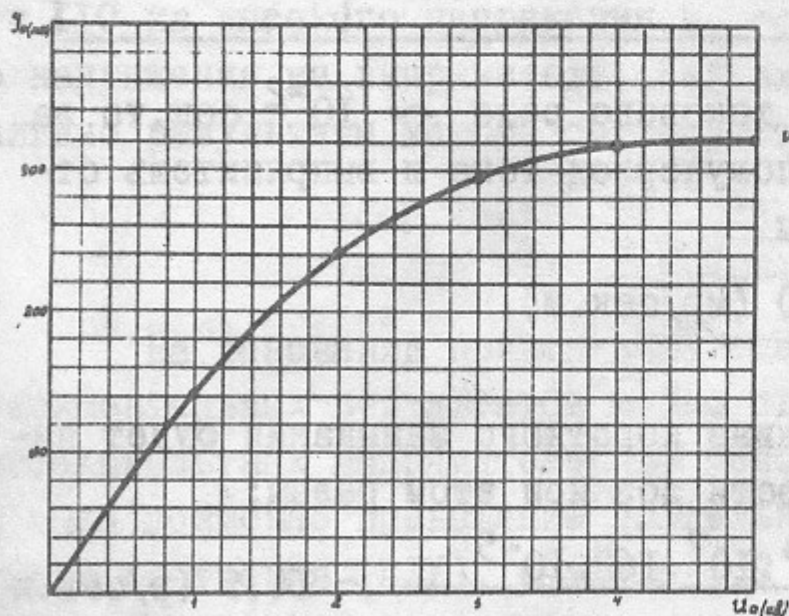


Рис.6.

$$P = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 100^{7/4} \cdot 42 \cdot 8 \cdot 10^{-7} \cdot 10^7}{12,56 \cdot 10^4 \cdot 0,114} = 8 \text{ (р/сек.м)}.$$

Опыт короткого замыкания проводился на выпрямителе ТВН-320 (ВС-110-20) с токовым реле при высоком напряжении 50 и 110 кв (см.рис.7), при этом получены следующие результаты:

1)  $U = 50$  кв; расстояние, на котором располагались дозиметры, 1 м от центра выпрямителя.

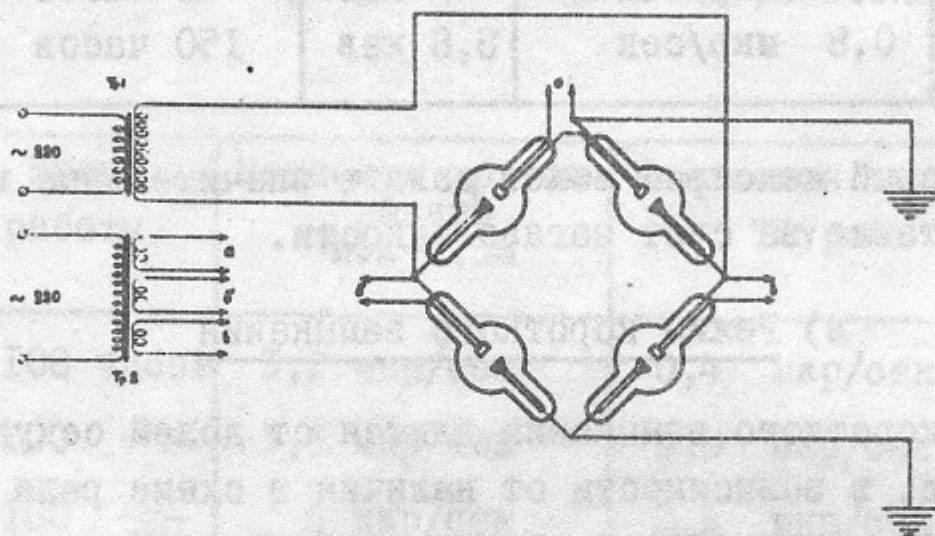


Рис.7.

Средние показания дозиметров МФК-2,3 М	Средние показания дозиметров ДК-0,2	Е эф.
$8 \pm 2$ мр/импульс	$2 \pm 0,2$ мр/импульс	12 кв

Если время срабатывания токового реле  $\sim 10^{-2}$  сек, то за это время пройдет только один полупериод тока и выпрямитель отключится, поэтому мощность дозы

$$P = \frac{8}{2 \cdot 10^{-2}} = 400 \text{ (мр/сек.м)}.$$

На одном кенотроне в режиме короткого замыкания будет падать  $\sim 25$  кв. Расчетные мощности доз при этом равны:

$$P = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 320 \cdot 42 \cdot 25^{7/4} \cdot 10^7 \cdot 162 \cdot 10^{-5}}{12,56 \cdot 10^4 \cdot 0,11} = 14,5 \text{ (р/сек.м)}.$$

С учетом поглощения в стенках колбы:  $P = P_0 e^{-\mu_{\text{эф}} X}$ ,

$$P \approx 14,5 e^{-30 \cdot 0,2} = 360 \text{ (мр/сек м.)}$$

Излучение от двух кенотронов будет 720 мр/сек м.

2.  $U = 110$  кв. Расстояние, на котором располагались дозиметры, 1 м от центра выпрямителя.

Средние показания дозиметров ИФК-2,3М	Средние показания дозиметров ДК-0,2	Е эф.
100 ± 20 мр/импульс	40 ± 5 мр/импульс	28 кэв

Если время срабатывания токового реле  $\sim 10^{-2}$  сек, то

$$P = \frac{100}{2 \cdot 10^{-2}} = 5 \text{ (р/м сек)}. \text{ Падение напряжения на одном}$$

кенотроне  $\sim 50$  кв. Расчетные мощности доз при этом:

$$P = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 42 \cdot 320 \cdot 50^{7/4} \cdot 26 \cdot 10^{-5} \cdot 10^7}{12,56 \cdot 10 \cdot 0,11} = 5,8 \text{ (р/сек м.)}$$

С учетом поглощения в стенках колбы кенотрона  $P \sim 4,3$  р/сек.м, а от двух кенотронов  $\sim 8,6$  р/сек.м.

Опыт проводился с токовым реле и без токового реле. В последнем случае выпрямитель питался от пускателя марки АП50-3МТ. При включении выпрямителя в режиме короткого замыкания автомат АП50-3МТ не сработал и два кенотрона вышли из строя. Время выхода из строя кенотронов  $\sim 2^{\text{х}}$  секунд, мощности доз в этом случае  $\sim 6$  р/м сек при 110 кв высокого напряжения и  $\sim 2,0$  р/м сек при 50 кв высокого напряжения на выпрямителе. Как видно, расчетные и экспериментальные результаты хорошо согласуются.

### 3. ВЫВОДЫ

На основании приведенных оценочных расчетов и полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что при эксплуатации высоковольтных выпрямителей на кенотронах при напряжении от 20 кв и выше возможно превышение предельно-допустимого уровня рентгеновского излучения (ПДУ), равного 0,8 мкр/сек, в  $10-10^6$  раз, вследствие: 1) колебания напряжения накала кенотрона на 1-3 вольта, 2) короткого

замыкания нагрузки выпрямителя и 3) загазованности баллона кенотрона.

Для предотвращения переоблучения сотрудников, работающих с высоковольтными выпрямителями можно рекомендовать следующее:

1. Новые высоковольтные выпрямители конструировать, где это возможно, не на кенотронах, а на полупроводниковых диодах.

2. Вновь конструируемые высоковольтные выпрямители на кенотронах оборудовать защитой от рентгеновского излучения. При напряжении до 50 кВ в качестве защиты можно использовать листовое железо 3-5 мм толщиной; при напряжении от 50 кВ и выше - свинец, толщиной 1-7 мм. Более точно толщина свинцовой защиты определяется по кривым ослабления  $I/I_0$ , приведенным на рис. 8.

3. На работающих высоковольтных выпрямителях, где установка защиты затруднительна, вести постоянный дозиметрический контроль. При работе необходимо следить за напряжением накала кенотрона, не допускать колебания напряжения накала более, чем на доли вольта от паспортных данных.

Для ограничения тока в режиме короткого замыкания нагрузки выпрямителя необходимо в схеме иметь токовое реле. В бесконденсаторных схемах выпрямления во вторичную цепь последовательно с сопротивлением нагрузки должно быть включено ограничительное сопротивление в 2-3 раза меньшее сопротивления нагрузки и с достаточной мощностью рассеивания. Это сопротивление ограничивает ток перегрузки (пробой рентгеновской трубки, закорачивание нагрузки и т. д.), и этим исключается возможность генерирования кенотроном рентгеновского излучения. Наличие этого сопротивления в схеме обязательно, так как при пробое даже с токовым реле, мощности доз велики. При использовании в выпрямителе высоковольтных конденсаторов в схемах удвоения, утроения, специальных импульсных или в схемах зарядки ёмкости, необходимо в первичную обмотку

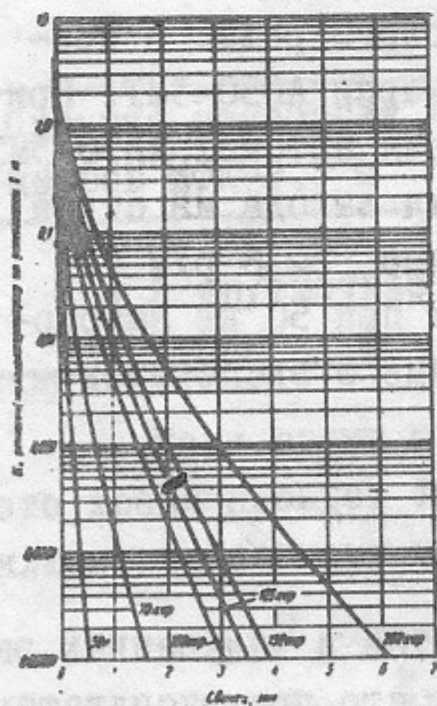
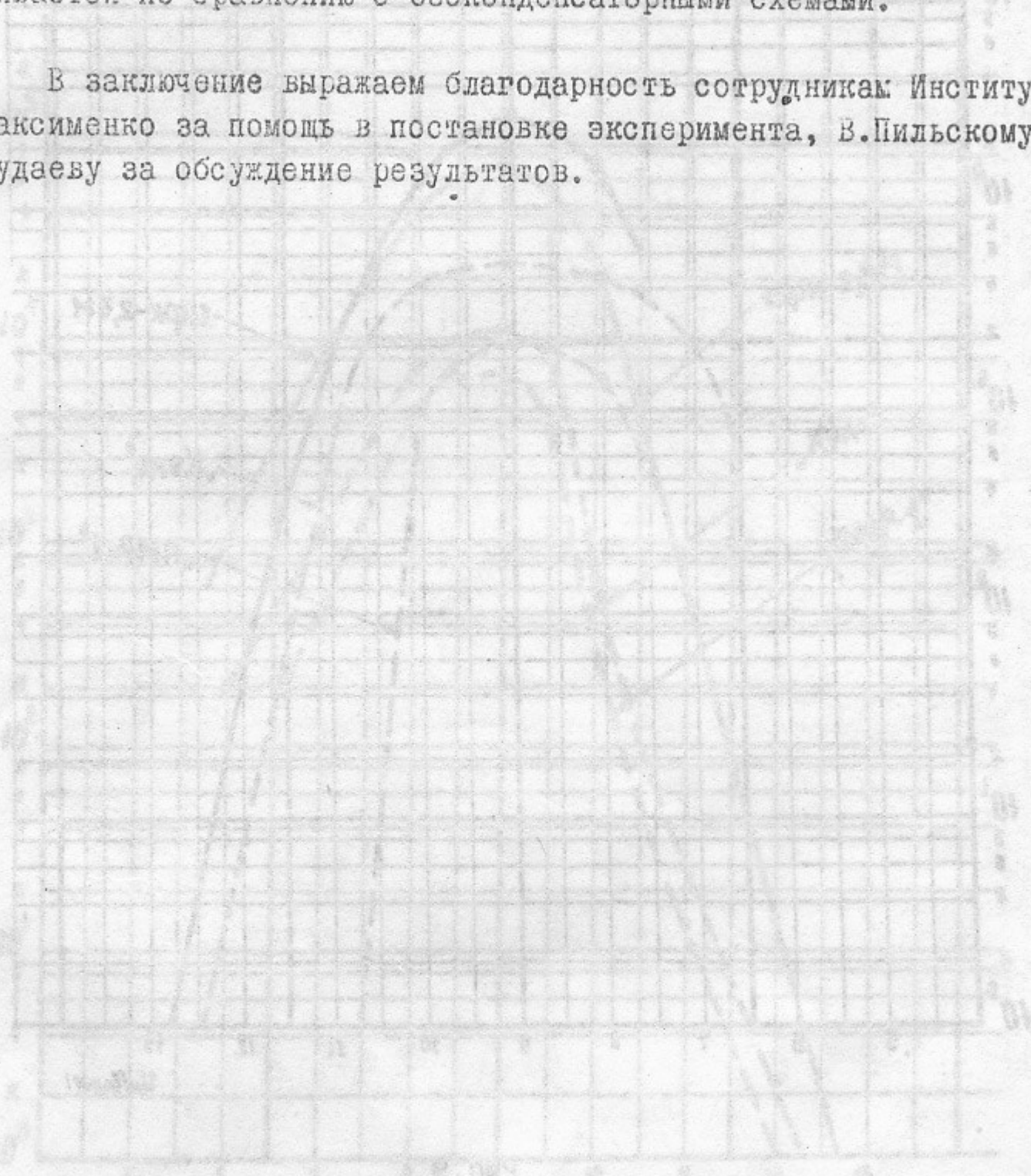


Рис. 8

трансформатора ставить небольшое сопротивление (несколько ом), чтобы ограничить режим по току при пробое ёмкости. Следует помнить, что в перечисленных схемах с ёмкостью в обратных полупериодах к кенотрону прикладывается удвоенное напряжение и интенсивность и жесткость рентгеновского излучения значительно увеличивается по сравнению с бесконденсаторными схемами.

В заключение выражаем благодарность сотрудникам Института Б.Максименко за помощь в постановке эксперимента, В.Пильскому и В.Чудаеву за обсуждение результатов.



Зависимость дозы рентгеновского излучения от частоты колебаний на 1 м. от конденсатора (ка 25 = 10^-10 ф) и емкости конденсатора (ка 25 = 10^-10 ф). Доза излучения 0,5 мкр/сек.

Зависимость дозы рентгеновского излучения от частоты колебаний на 1 м. от конденсатора (ка 25 = 10^-10 ф) и емкости конденсатора (ка 25 = 10^-10 ф). Доза излучения 0,5 мкр/сек.

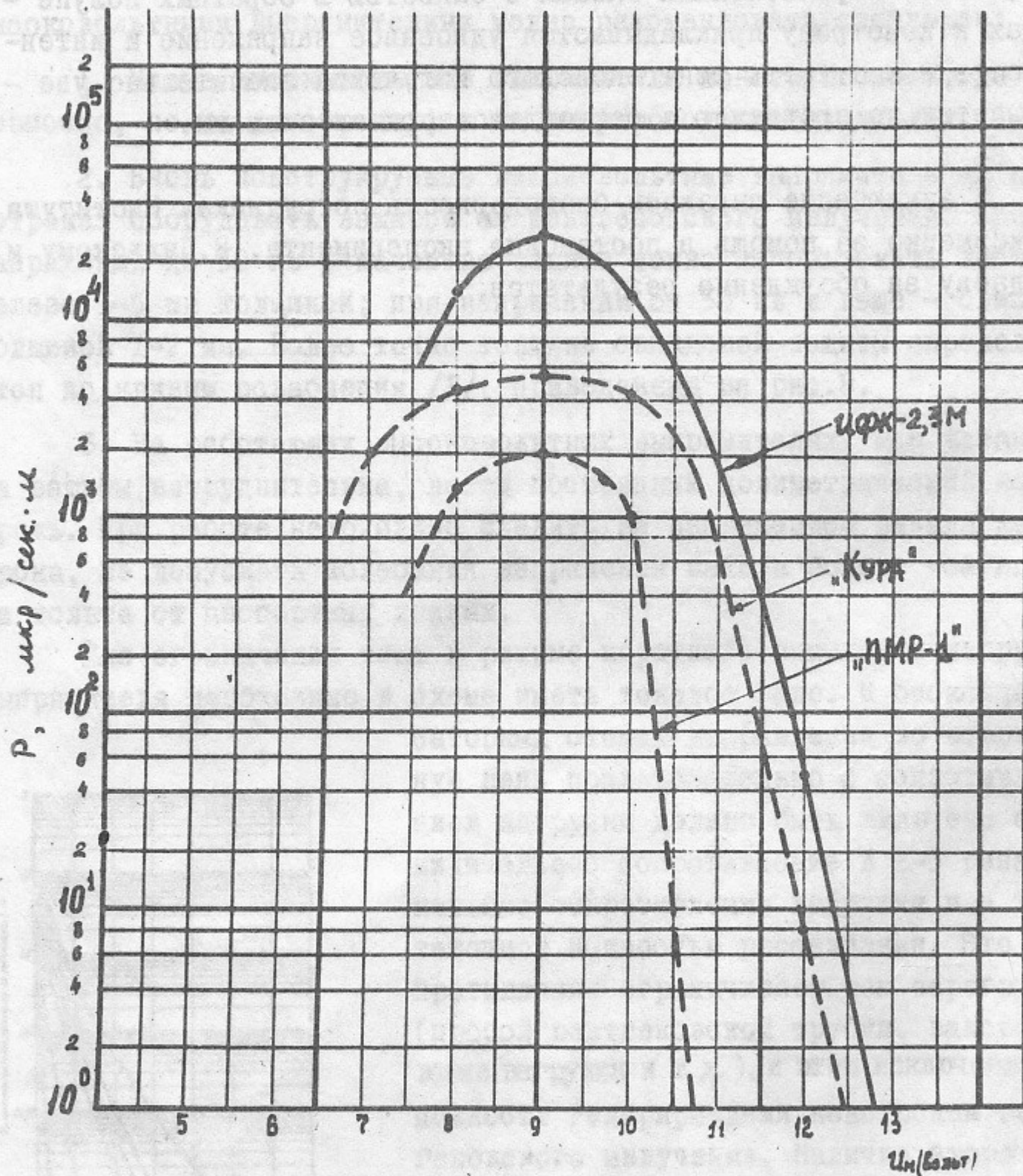


Рис.9

Зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от напряжения накала кенотронов на I м. от выпрямителя. ( $U_{A-K} = 25$  кв). Предельно-допустимый уровень 0,8 мкр/сек.

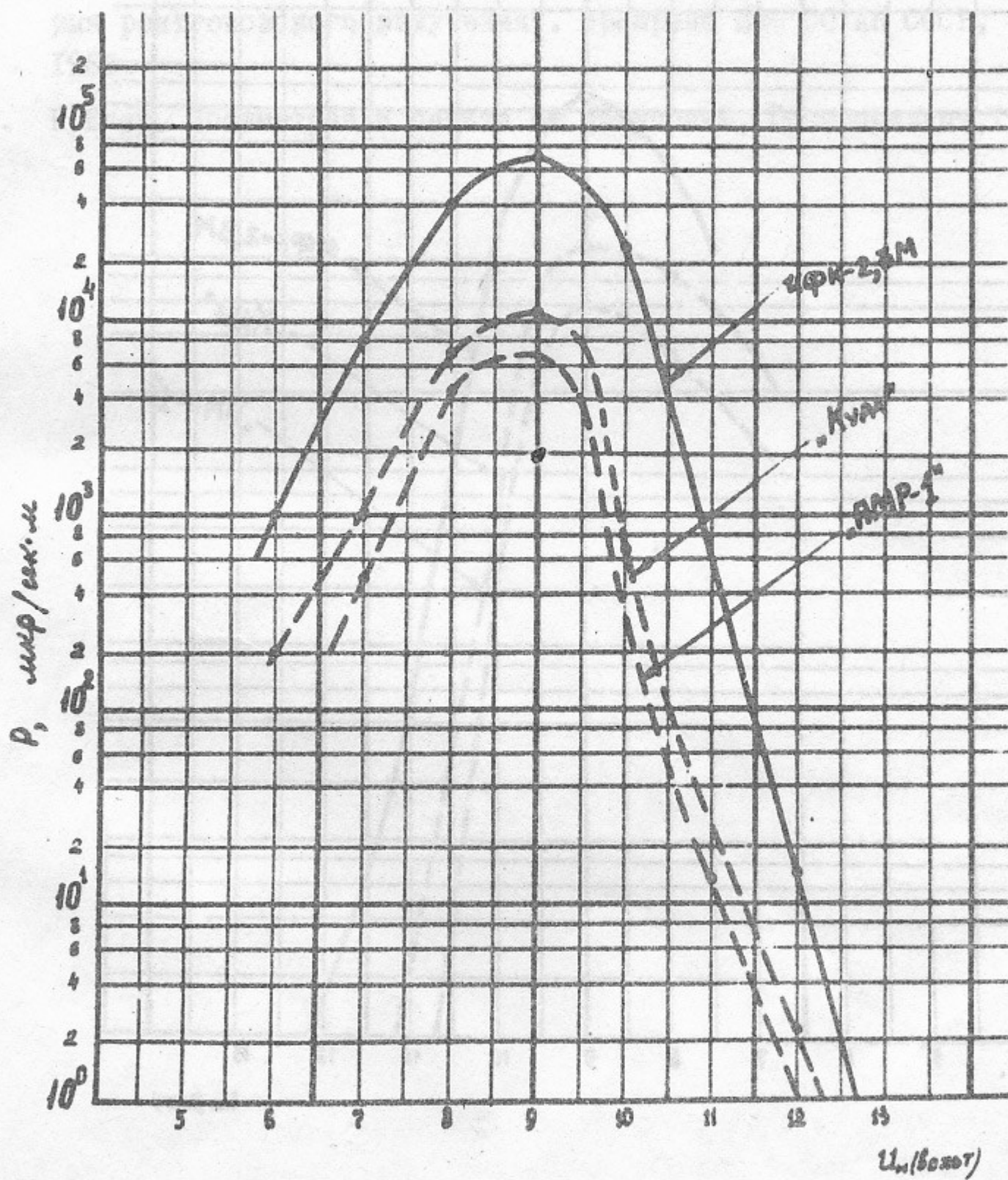


Рис. 10

Зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от напряжения накала кенотронов на 1 м. от выпрямителя. ( $U_{A-K} = 50$  кв.).  
 Предельно-допустимый уровень 0,8 мкр/сек.

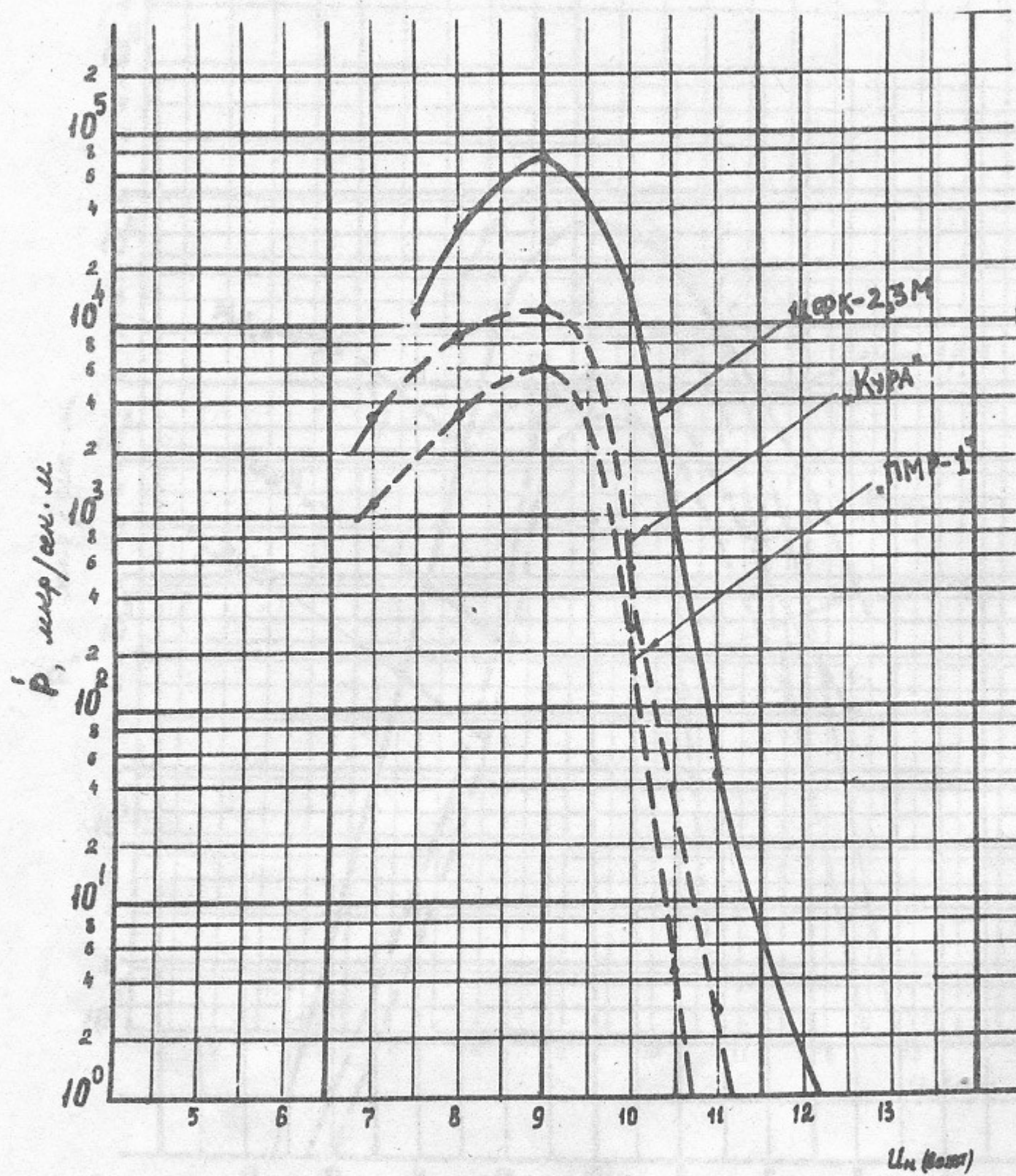


Рис. II

Зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от напряжения накала кенотрона на 1 м. от выпрямителя. ( $U_{A-K} = 110$  кв). Пределно-допустимый уровень 0,8 мкр/сек.



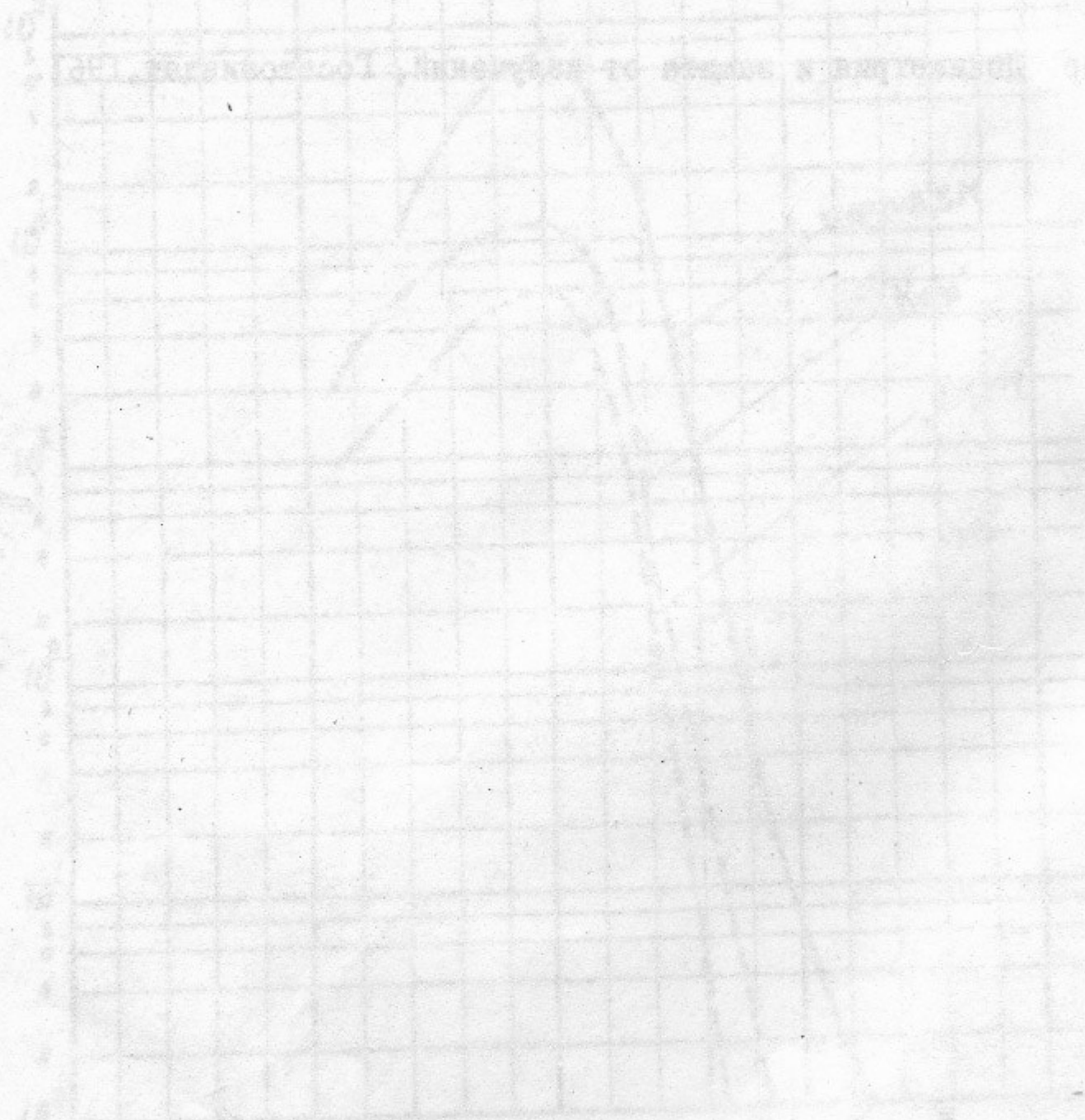
## Л и т е р а т у р а

1. К.Б.Брэстрап, Г.О.Уикофф. Руководство по радиационной защите, Госатомиздат, 1962.
2. В.С.Григорьев, Г.М.Протопопова. "Фотографическая дозиметрия рентгеновского излучения". Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1966.
3. Р.Егер. Дозиметрия и защита от излучений, Госатомиздат, 1961.

1. А. А. Бондарев, Т. О. Уткин. Ручное управление по радиальной шкале. Труды ИЯФ СО АН СССР, 1965.

2. А. А. Бондарев, Т. О. Уткин. Ручное управление по радиальной шкале. Труды ИЯФ СО АН СССР, 1965.

3. А. А. Бондарев, Т. О. Уткин. Ручное управление по радиальной шкале. Труды ИЯФ СО АН СССР, 1965.



---

Ответственный за выпуск Протопопова Г.М.

Подписано к печати 5.УІ-1967 г.

Усл. 0,8 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.

Заказ № 136

---

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР.