

Рис. 2. Комбинированная номограмма для определения времени просвечивания при применении источников облучения из  $\text{Ir}^{192}$ ,  $\text{Tu}^{170}$ ,  $\text{Eu}^{152}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  и  $\text{Co}^{60}$ .

Ключ номограммы  $Qdn; nFt$ . Пользуются номограммой следующим образом: при заданных значениях  $Q = 0,6$  г-экв Ra и  $d = 70$  мм ищут точку пересечения

линий этих значений. От этой точки пересечения проводят линию, параллельную диагонали до пересечения с линией, соответствующей заданному значению  $F = 35$  см. Вторая точка пересечения и определяет время просвечивания  $t = 42$  мин = 0,7 ч (см. рис. 1).

Кроме того, в верхнем правом углу номограммы имеется шкала, каждое деление которой соответствует логарифму годового уменьшения интенсивности источника. Таким образом, если известны первоначальная интенсивность источника и время, прошедшее от первоначального измерения интенсивности этого источника, то можно с помощью данной шкалы определить, какова интенсивность источника в данный момент, и при пользовании номограммой исходить уже из данной интенсивности.

Аналогично этой номограмме для  $\text{Co}^{60}$  можно построить и номограммы для радионуклидов  $\text{Ir}^{192}$ ,  $\text{Tu}^{170}$ ,  $\text{Eu}^{152}$  и  $\text{Cs}^{137}$ , чаще других используемых при дефектоскопии стали и чугуна.

На практике дефектоскопические методы получили наиболее широкое применение для контроля изделий из черных металлов и алюминия. Поэтому для практических целей удобно пользоваться единой комбинированной номограммой (рис. 2).

Поступило в Редакцию 31/VII 1962 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Румянцев. Применение радиоактивных изотопов в дефектоскопии. М., Атомиздат, 1960.
2. У. Уайтгайр. Промышленная радиография. М., Атомиздат, 1960.
3. С. В. Румянцев, Л. Н. Мациук. Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Докл. советских ученых. Т. 6. М., Атомиздат, 1959, стр. 160.
4. В. И. Постников, В. А. Летенко. Эффективность радиоактивного контроля в машиностроении. М., Машгиз, 1960.

1539.1.

## Фотографическая дозиметрия индивидуального $\beta$ - и $\gamma$ -облучения

В. Ф. Козлов

В работах [1—8] по исследованию физических характеристик отечественных фотоэмульсий были получены данные, которые свидетельствуют о возможности ведения дозиметрического контроля  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучений и потоков тепловых и быстрых нейтронов. Однако в этих работах не рассмотрен вопрос смешанного воз-

действия  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений на фотоэмульсию. Хотя часто возникает необходимость проведения индивидуальной фотодозиметрии сравнительно мягкого и очень мягкого  $\gamma$ -излучений с энергиями квантов выше 20 кэв и более, в указанных работах не была исследована спектральная чувствительность фотоэмульсий в диапа-



зоне 20—110 кэв. Знание спектральной чувствительности в этой области становится совершенно необходимым в связи с использованием тех же фотоэмульсий для одновременного измерения доз  $\beta$ -облучения.

Цель настоящей работы — описание методики, дополняющей существующий индивидуальный фотоконтроль  $\gamma$ -облучения (ИФК-3) измерением мягкого  $\gamma$ -излучения (20—110 кэв), что имеет также существенное значение для определения доз  $\beta$ -облучения в смешанных полях  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений. Для этого вначале была исследована зависимость степени почернения рентгенопленки от энергии  $\gamma$ -излучения. Пленки, завернутые

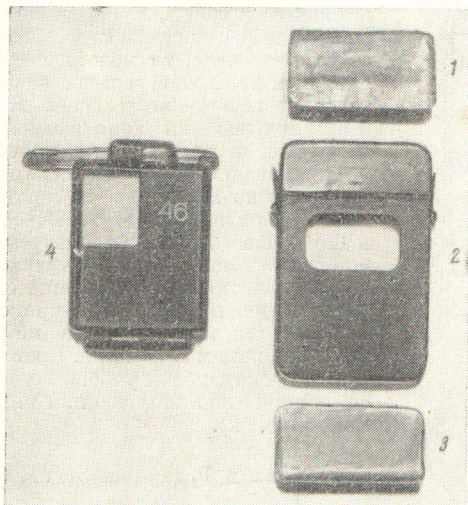


Рис. 1. Внешний вид и конструкция кассет ИФК.

1 — свинцовый фильтр; 2 — стандартная кассета ИФК; 3 — алюминиевый фильтр; 4 — новая кассета ИФК-2,3.

в два слоя черной светонепроницаемой бумаги толщиной 14 мг/см<sup>2</sup>, помещали в специальные кассеты и облучали дозами  $\gamma$ -излучения, измеренными с высокой степенью точности с помощью эталонных установок ВНИИ Метрологии им. Д. И. Менделеева. Эти кассеты (рис. 1) имеют одно отверстие размером 15×20 мм и три фильтра толщинами 400 мг/см<sup>2</sup> (гетинакс), 860 мг/см<sup>2</sup> (алюминий и гетинакс) и 1300 мг/см<sup>2</sup> (свинец и гетинакс), причем последний фильтр полностью соответствует фильтру, применяемому в настоящее время в кассетах ИФК. Результаты теоретического рассмотрения действия сглаживающих фильтров [1, 9, 10] достаточно хорошо согласуются с ходом кривых на рис. 2. На облученной и проявленной пленке можно выделить четыре участка с различной плотностью почернения. Экспериментальные кривые рис. 2 соответствуют этим участкам.

Из хода кривых видно, что по соотношению почернений пленки на четырех участках можно судить об энергии  $\gamma$ -излучения, воздействующего на кассету. Так, например, если почернения всех участков практически одинаковы, то излучение имеет энергию выше 300 кэв. В диапазоне энергий 60—300 кэв почернения первого, второго и третьего участков практически одинаковы, а четвертого — заметно слабее первых трех. Для оценки энергии излучения в диапазоне 20—60 кэв

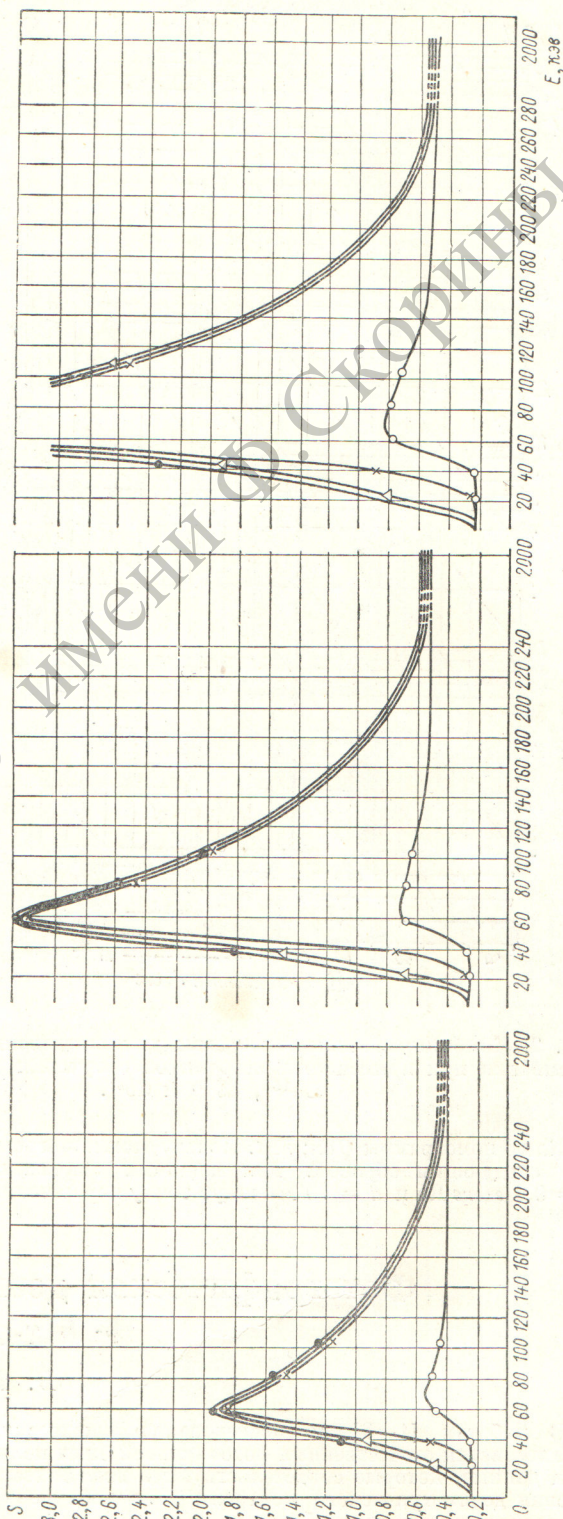


Рис. 2. Зависимость почернения  $S$  пленки «Рентген XX» от энергии  $\gamma$ -излучения для дозы облучения 0,1—0,3 р.



необходимо использовать упомянутые выше фильтры как поглотители излучения и по соотношению почернений первого, второго и третьего участков установить эту энергию.

В работе [3] было показано, что с точностью  $\pm 20\%$  чувствительность пленки «Рентген XX» к допустимым дозам  $\beta$ -излучения не зависит от их энергии в диапазоне 0,2—2,0 Мэв. Это обстоятельство значительно упрощает применение фотопленки для целей дозиметрического контроля, так как при этом отпадает необходимость внесения поправки на спектральный состав  $\beta$ -излучения.

Правильная оценка дозы  $\beta$ -излучения возможна лишь при точном знании вклада  $\gamma$ -излучения в почернение, образованное под окном кассеты. Использование трех фильтров позволяет успешно преодолеть эту трудность.

Если ограничиваться измерением  $\beta$ -излучателей с максимальной энергией  $\beta$ -частиц 3,5 Мэв, то можно показать, что почернение третьего и четвертого участков пленки обусловлено в основном  $\gamma$ -излучением. Это ограничение вполне правомерно в условиях облучения  $\beta$ -частицами изотопов осколочного происхождения и в ряде других случаев. Используя табличные значения [11] толщин материалов, требуемых для полного поглощения  $\beta$ -частиц, можно видеть, что через третий фильтр будут проникать  $\beta$ -частицы с энергиями, превышающими 2,2 Мэв; через четвертый — превышающими 3,0 Мэв. Однако хорошо известно, что в сплошном спектре  $\beta$ -излучателя число частиц с высокими энергиями невелико. Кроме того, используя формулы работы [12], можно показать, что для наиболее жесткого  $\beta$ -излучателя доза, поглощенная в фотоэмульсии, на участке, закрытом светонепроницаемой бумагой, более чем в десять раз превышает дозу, поглощенную на участке за третьим фильтром и тем более за четвертым.

Для определения доз  $\gamma$ -излучения следует облучить несколько кассет с помощью образцового источника  $\gamma$ -квантов и построить контрольные кривые зависимости плотности почернения всех участков пленки от доз  $D_\gamma$   $\gamma$ -излучения. Обозначим эти плотности соответственно  $S_1(D_\gamma)$ ,  $S_2(D_\gamma)$ ,  $S_3(D_\gamma)$ ,  $S_4(D_\gamma)$  (рис. 3). Измерив плотности почернения рабочей пленки, по  $S_4$  и контрольной кривой  $S_4(D_\gamma)$  находим дозу  $\gamma$ -облучения обычным способом ИФК. Затем по контрольным кривым  $S_1(D_\gamma)$ ,  $S_2(D_\gamma)$  и  $S_3(D_\gamma)$  определяем плотности почернения  $S_1^K$ ,  $S_2^K$  и  $S_3^K$ , соответствующие найденной дозе  $\gamma$ -облучения.

Эти данные позволяют ориентировочно найти энергию  $\gamma$ -излучения:

1. Если отношение плотностей почернений  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  рабочей пленки близко (в пределах  $\pm 10\%$ ) к отношению  $S_2^K$ ,  $S_3^K$  и  $S_4^K$ , определенных по контрольным кривым, то энергия  $\gamma$ -излучения лежит в диапазоне от 300 кэв и более.

2. Если отношение плотностей почернений  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  рабочей пленки выше отношения  $S_2^K$ ,  $S_3^K$  и  $S_4^K$ , определенных по контрольным кривым, то  $\gamma$ -излучение имеет энергию 45—300 кэв. В этом случае для уточнения энергии необходимо пользоваться эталонными кривыми рис. 2 и по отношению плотностей почернений  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  рабочей пленки и отношению  $S_2^a$ ,  $S_3^a$  и  $S_4^a$  эталонных кривых, соответствующих найденной дозе, определить энергию излучения. При этом, если взуальное почернение  $S_0^K$  контрольных кривых не совпадает с взуаль-

ным почернением  $S_0^a$  эталонных кривых, то вносят поправку на это различие в измеренные почернения (в нашем случае  $S_0^a$  оказалось равным 0,24).

3. Если почернение  $S_4$  рабочей пленки равно взуальному  $S_0^K$ , то возможно облучение в диапазоне энергий 20—45 кэв. Сравнивая соотношение почернений  $S_2$  и  $S_3$  рабочей пленки и соотношение почернений  $S_2^a$  и  $S_3^a$  эталонных кривых, находят энергию и дозу рентгеновского излучения.

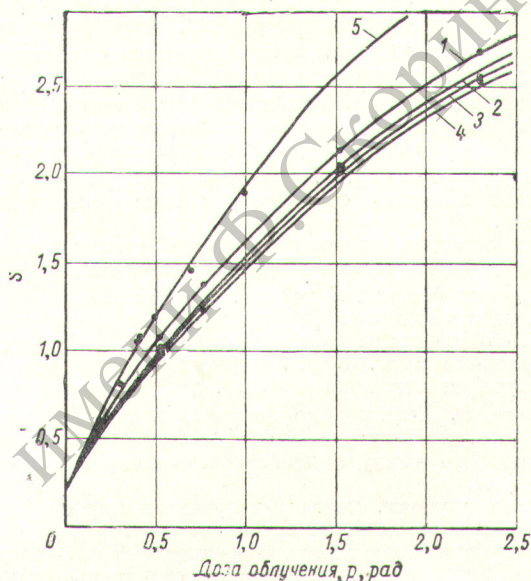


Рис. 3. Зависимость почернения  $S$  пленки «Рентген XX» от дозы  $\gamma$ -излучения (кривые 1, 2, 3, 4) и дозы  $\beta$ -излучения (кривая 5).

4. Если почернения  $S_4$  и  $S_3$  рабочей пленки равны взуальному  $S_0^K$ , то рентгеновское излучение имеет энергию ниже 25 кэв. В этом случае определение дозы рентгеновского излучения производят по почернению  $S_2$  рабочей пленки путем сравнения его с почернениями  $S_2^a$  эталонных кривых.

5. Если почернения  $S_4$ ,  $S_3$  и  $S_2$  рабочей пленки равны взуальному  $S_0^K$ , то почернение  $S_1$  рабочей пленки обусловлено только  $\beta$ -облучением.

Для повышения точности определения доз облучения мягкими рентгеновскими лучами (20—45 кэв) методом сравнения почернений рабочих пленок с соответствующими эталонными кривыми рис. 2 необходимо снизить влияние фактора проявления. С этой целью следует строго соблюдать режим фотообработки рабочих пленок, рекомендованный заводом-изготовителем. Измерения доз выше 0,3 р в диапазоне энергий 45—150 кэв с помощью пленки «Рентген XX» невозможны, так как эти дозы вызывают такую высокую степень почернения, которая не поддается денситометрии.

Для оценки  $\beta$ -облучения необходимо использовать формулы

$$D_\beta = \frac{S_1 - S_1^K}{B}$$

при наличии сопутствующего  $\gamma$ -излучения с  $E_\gamma$  от 300 кэв и выше;



$$D_{\beta} = \frac{S_1 - S_1^a}{B}$$

при наличии сопутствующего рентгеновского излучения с  $E_{\gamma}$  ниже 300 кэв;

$$D_{\beta} = \frac{S_1 - (S_3 + \delta)}{B}$$

при наличии сопутствующего  $\beta$ -излучения с  $E_{\gamma}$  от 45 кэв и выше\*.

Здесь  $D_{\beta}$  — доза  $\beta$ -облучения в радах;  $S_1$  — плотность почернения рабочей пленки, измеренная под окном кассеты;  $S_1^k$  — плотность почернения, создаваемая найденной дозой  $\gamma$ -излучения под окном кассеты;  $S_1^a$  — плотность почернения под окном кассеты, создаваемая найденной дозой рентгеновского излучения с уточненной энергией (определяется по эталонным кривым);  $\delta = S_1^k - S_3^k$ ;  $B$  — коэффициент почернения, величина которого соответствует дозе  $\beta$ -облучения в 1 рад.

Для определения коэффициента  $B$  строят кривую зависимости плотности почернения пленки  $S_{\beta}$  от дозы  $\beta$ -облучения (кривая 5 на рис. 3). Она может быть получена с помощью образцовых стронциевых  $\beta$ -источников, создающих за определенное время необходимые интегральные дозы. Крутизна наклона этой кривой, определяемая отношением  $S_{\beta}/D_{\beta}$ , дает значение коэффициента  $B$ . Если можно получить дозовую кривую с помощью тех  $\beta$ -излучателей, с которыми фактически работают, то следует использовать такую возможность [13].

В тех случаях, когда  $\beta$ -излучатели мягкие (максимальная энергия  $\beta$ -спектра менее 0,5 Мэв), необходимо определить значение коэффициента  $B$  по дозовым кривым  $\beta$ -излучения, полученным с помощью таких излучателей.

Для приближенного вычисления  $D_{\beta}$  можно использовать контрольную кривую  $\gamma$ -облучения. Для этого определяют ее крутизну  $\Gamma = \frac{S_{\gamma}}{D_{\gamma}}$ , затем крутизну дозовой кривой для  $\beta$ -излучения  $B = \frac{S_{\beta}}{D_{\beta}}$  и вычис-

\* Формулу используют для упрощения расчета дозы  $\beta$ -облучения при наличии мягкого  $\gamma$ -излучения (от 45 кэв и выше) без применения вычислений по эталонным кривым. В этом случае следует использовать только контрольные кривые, внося поправку  $\delta = S_1^k - S_3^k$ .

ляют их отношение  $\frac{\Gamma}{B} = P$ . Считая с некоторой ошибкой, что  $P$  постоянно, вместо коэффициента  $B$  используют величину  $\Gamma/P$ .

Точность измерения доз  $\beta$ -излучения в отсутствие  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий от 0,2 до 3,5 Мэв составляет  $\pm 20\%$ ; при наличии  $\gamma$ -излучения следует учесть ошибку в определении доз  $\gamma$ -излучения, что в сумме составляет 40%.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность Ю. В. Сивинцеву и М. Ф. Юдину за помощь и содействие в работе, К. К. Аглинцеву и К. С. Богомолу за замечания при обсуждении работы, В. С. Меркуловой за помощь в измерениях.

Поступило в Редакцию 11/X 1962 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Никитин. Исследования в области дозиметрии ионизирующего излучения. М., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 123.
2. К. К. Аглинцев, В. В. Смирнов, М. Н. Чубаров. «Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр.», 7, вып. 6, 444 (1962).
3. В. Ф. Козлов, В. Ф. Соленков. В кн. «Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений». Вып. I. Под ред. Ю. В. Сивинцева. М., Атомиздат, 1960, стр. 64.
4. В. Ф. Козлов. Там же, стр. 106.
5. В. Ф. Козлов, В. С. Меркулова. В кн. «Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений». Вып. II. Под ред. Ю. В. Сивинцева. М., Госатомиздат, 1961, стр. 23.
6. Н. С. Никитин. «Вест. рентгенол. и радиол.», № 4, 59 (1959).
7. Л. С. Друскина и др. «Атомная энергия», 12, вып. 1, 57 (1962).
8. Л. С. Золин и др. «Атомная энергия», 13, вып. 5, 467 (1962).
9. M. Ehrlich. Nucleonics, 9, No 3, 5 (1951).
10. А. К. Аглинцев. Дозиметрия ионизирующих излучений. Изд. 2. М., Физматгиз, 1960.
11. Н. Г. Гусев. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. М., Медгиз, 1956.
12. R. Loevinger. Radiology, 66, 55 (1956).
13. T. Cippereley. Health Physics, 4, 173 (1960).

