

К-636

28/1-74



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ОТДЕЛ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

4283/2-74

P16-8175

М.М.Комочков, М.И.Салацкая

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО
ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
НА УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ОИЯИ**

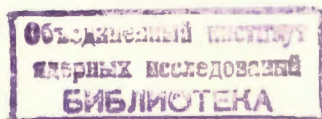
Дубна 1974

P16-8175

М.М.Комочков, М.И.Салацкая

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО
ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
НА УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ОИЯИ**

Направлено на IV Всесоюзное совещание по ускорителям
заряженных частиц (Москва, 1974)



Для определения индивидуальных доз ионизирующих излучений, получаемых сотрудниками при работе вблизи ядернофизических установок в Объединенном институте ядерных исследований, в настоящее время используются стандартные кассеты ИФК-2,3 [1]. Применяемая в кассетах рентгеновская пленка "ORWO" (RD-3 и RD-4) позволяет измерять дозу рентгеновского и гамма-излучения в пределах от $0,02P$ до $(60+70)P$ в интервале энергий 20 кэВ+3 МэВ с точностью $\pm 20\%$. Доза бета-излучения в интервале энергий $(0,12+3)$ МэВ и интервале доз $(0,02+15)$ рад в отсутствие рентгеновского и мягкого гамма-излучений может быть измерена с точностью $\pm 40\%$, в присутствии же этих излучений ошибка в определении дозы бета-излучения резко возрастает [4].

Для определения аварийных доз (по гамма-излучению) с конца 1970 года у некоторых сотрудников в кассеты вкладываются термолуминесцентные дозиметры на основе LiF (порошок), с помощью которых можно измерять экспозицию гамма-излучения с энергией более 40 кэВ в интервале доз $(10+10000)P$ [2]. Для измерения дозы нейтронов в широком энергетическом интервале в свободную ячейку кассеты ИФК-2,3 вставляется пленка с нанесенным на нее 20-микронным слоем ядерной эмульсии типа "K" в корректирующем пакете - ИФКн [3,4]. В таблице I представлены характеристики методик индивидуального дозиметрического контроля, используемых в ОИЯИ в 1964 и 1974 годах.

Впервые введенная в ОИЯИ в 1961 году методика измерения индивидуальной дозы нейтронов предназначалась для измерения дозы быстрых нейтронов в интервале энергий $(0,5+15)$ МэВ; результаты контроля интерпретировались как дозы нейтронов указанного интервала энергий. Позднее в 1972 году [4] была произведена оценка чувствительности используемого у нас индивидуального дозиметра нейтронов

к дозе тепловых и промежуточных нейтронов и экспериментально проверена чувствительность дозиметра к тепловым нейтронам. Оказалось, что дозиметр более чувствителен к тепловым нейтронам, чем к быстрым, а наличие альбедного эффекта промежуточных нейтронов позволяет их регистрировать.

Таблица I

Характеристики методик ИФК

Вид излучения	1964 год		1974 год		Год введения методики
	Энергетический интервал, эВ	Пределы измерения, бэр	Энергетический интервал, МэВ	Пределы измерения, бэр	
β - излучение	-	-	0,1+3,5	0,02+15	1965
мягкое γ -излучение	-	-	0,01+0,12	0,02+10	
жесткое γ -излучение	0,3+3,5	0,02+15	0,12+3,5	0,02+70	1970
α -излучение	-	-	0,04+3,5	10+10000	
нейтроны	0,5+15	0,02+14	10^{-8} +15	0,02+14	1971
нуклоны мезоны	-	-	$E_n > 100$ $E \geq 0$	0,06+60	1973

В таблице 2 приведена чувствительность дозиметра в расчете на 1 бэр к нейтронам различных энергий.

Основываясь на приведенных в таблице величинах чувствительности дозиметра к нейтронам разных энергий и на вкладах в дозу нейтронов различных энергетических групп за защитой ядерно-физических установок ОИЛИ, можно сказать, что показания индивидуального дозиметра с ядерной эмульсией при работе в помещениях

за защитой могут быть ниже дозы нейтронов на 10+30%. С другой стороны, в поле частиц высоких энергий, где их вклад в эквивалентную дозу превышает 5%, показания индивидуального дозиметра могут быть выше дозы нейтронов [5].

Таблица 2.

Чувствительность к нейтронам индивидуального дозиметра с эмульсией типа "К", расположенного на фантоме человека.

Диапазон энергий нейтронов	Чувствительность, трек. см ⁻² . бэр ⁻¹	Метод определения [4]
тепловые нейтроны (E < 0,4 эв)	1,6.10 ⁴	Эксперимент + расчет
0,4 эв + 0,5 Мэв (спектр I/II)	0,16.10 ⁴	Расчет
0,5 Мэв + 15 Мэв (источник Po+Be)	0,92.10 ⁴	Эксперимент

Определение степени достоверности результатов индивидуального дозиметрического контроля проводилось путем сравнения показаний дозиметра ИФКн с показаниями других приборов в некоторых точках вблизи ускорителей высоких энергий (синхроциклотрона ЛЯИ и синхрофазотрона ЛВЭ). В сравнительных измерениях использовались приборы, основные параметры которых приведены в таблице 3. Для сравнения выбирались точки, где возможно было достижение условий максимально "жесткого" и "мягкого" спектров нейтронов, как одного из основных компонентов проникающей радиации.

На рис. 1,2,3 указаны точки, вблизи которых на синхроциклотроне и синхрофазотроне проводилось сравнение показаний ИФКн с наиболее достоверной дозой, полученной с помощью других средств (табл.3). Точки 1,3 рис.1 расположены за защитой без проемов

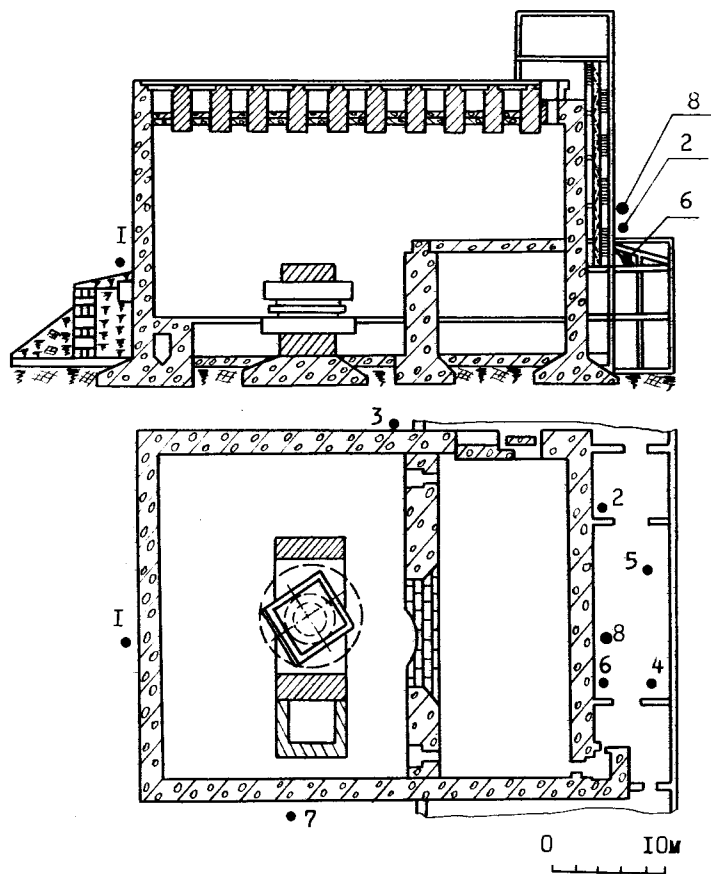


Рис.1. План и разрез здания синхроциклотрона на энергию протонов 660 Мэв; 1-8 - точки измерения.

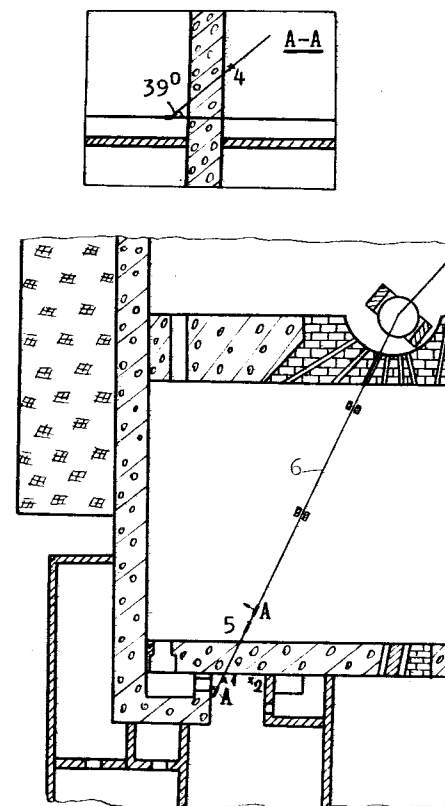


Рис.2. Геометрия опыта при гашении протонов (6) с энергией 660 Мэв в толстой мишени (5); 1-4 - точки измерения.

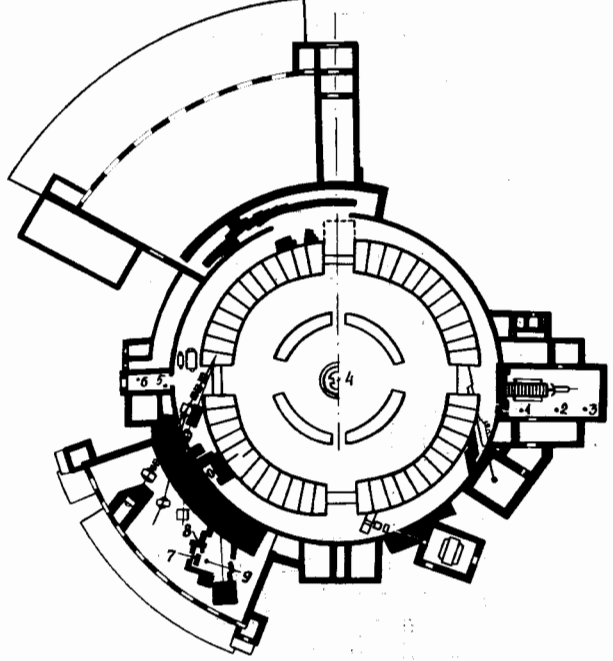


Рис.3. План здания синхрофазотрона на энергию протонов 10 Гэв:
1-9 - точки измерения.

Таблица 3

Приборы и их параметры

Наименование прибора или детектора	Энергетические диапазоны, эв	Вид регистрируемого излучения	Размерность измеряемой величины	Диапазон измерения
Спектрометр Боннера [56]	$10^{-2} + 10^8$	нейтроны	мэр/час	$0, 1 + 2 \cdot 10^3$
Активационный детектор <i>(¹²C, ¹¹B, ¹⁰B)</i> [17]	$2 \cdot 10^7$	адроны	адрон/см ² .сек	> 1
Ионизационная камера, работающая в режиме насыщения и в режиме рекомбинации ионов [18] КЕМ-2	частицы с пробегом $> 0,4 \text{ г/см}^2$	частицы + β - кванты	мэр/час	$1 + 10^3$
Ионизационная камера со стенками из алюминия, наполненная воздухом	$2 \cdot 10^5 + 3 \cdot 10^6$ (β)	β - кванты + заряженные частицы	мэр/час	$0, 2 + 10^3$
Индивидуальный фотоконтроль	нейтроны	нейтроны	бэр	$0, 02 + 15$
	β - излучение	β - кванты	рентген	$0, 02 + 70$

*) Сравнение показаний электрометров с алюминиевой камерой, наполненной воздухом, и графитовой камерой, наполненной CO_2 , показывает, что в поле излучения за защитой ускорителей алюминиевая камера чувствительнее графитовой на ~25%.

и каналов, поэтому в них формируется "жесткий спектр", а в точки 2,4,5,6 многократно рассеянные нейтроны проходят через проемы в защите - "мягкий спектр". Промежуточные условия имели место в других точках (рис.2 и 3). Результаты сравнения представлены в таблице 5.

За наиболее вероятное значение мощности эквивалентной дозы P принимается среднее из показаний рекомбинационной камеры и суммы показаний спектрометра Боннера P_1 и активационного метода P_2 ; в точках 2,4,5 и 6 рис.1 к этой сумме прибавляли P_3 . При отсутствии данных $REM-2$ наиболее вероятным значением эквивалентной дозы считали $P_1 + P_2$.

В таблицу внесены данные ИФКн при облучении кассет без фантома (за исключением т.7 рис.3). Из таблицы видно, что в условиях "мягкого" спектра нейтронов доза P_H , определенная с помощью кассет ИФКн, может быть занижена по сравнению с наиболее вероятной в среднем в 2 раза. В условиях "жесткого" спектра показания ИФКн могут быть во много раз больше эквивалентной дозы нейтронов. Сравнение показаний дозиметров при облучении с фантомом и без него в точках 1 и 8 (рис.1) представлено в таблице 4.

Таблица 4

Эквивалентная доза (мбэр), зарегистрированная дозиметрами ИФКн за 10-часовую экспозицию с фантомом и без него.

Условия измерения	точка 8 рис.1			точка 1 рис.1		
	P_H	P_{γ}	$P_H + P_{\gamma}$	P_H	P_{γ}	$P_H + P_{\gamma}$
без фантома	38±9	49±8	87±12	2460±550	30	2490±550
с фантомом	92±22	110±17	202±28	2850±630	34	2880±630
с фантомом	:	:	:	:	:	:
без фантома	2,4	2,2	2,3	1,15	1,1	1,15

Из таблицы 4 видно, что присутствие фантома увеличивает показания ИФКн по нейтронам и по гамма-излучению примерно в 2 раза в случае облучения "мягким" спектром, что в основном соответствует условиям, в которых работают сотрудники вблизи ускорителей, и только на 15% - в условиях "жесткого" спектра. Увеличение показаний дозиметра в 2 раза при облучении на фантоме приводит к тому, что в реальных условиях показания дозиметра, как правило, не фиксируют заниженную дозу.

В поле релятивистских частиц, когда их вклад в суммарную дозу превышает 5%, показания дозиметра ИФКн необходимо скорректировать.

Предлагается 2 метода коррекции показаний дозиметров ИФКн, которая имеет, на наш взгляд, смысл, когда показания ИФКн превышают 1/3 от предельно допустимой дозы за соответствующий период. При разработке первого метода исходили из того, что спектр нейтронов в любой точке за защитой ускорителей высоких энергий можно рассматривать в виде:

$$N(E) = N_p(E) + N_{рас}(E),$$

где $N_p(E)$ - равновесный спектр за защитой,

$N_{рас}(E)$ - спектр рассеянных нейтронов, пришедших в данную точку через каналы и проемы в защите.

За сплошной защитой без проемов и каналов можно принять

$$N_{рас}(E) = 0.$$

Суммарная истинная доза нейтронов соответственно будет равна:

$$D = D_{рас} + D_p. \quad (I)$$

Можно считать, что $D_{рас}$ без искажений регистрируется дозиметром ИФКн, т.к. многократно рассеянные нейтроны имеют энергию, в основном, <20 Мэв. Дозу D_p , обусловленную равновесным спектром,

Таблица 5

Сравнение показаний ИФЭИ с показаниями других дозиметров, измеряющих эквивалентную дозу

Обозначение, прибор		Синхроциклотрон, рис.1							Синхроциклотрон, рис.2			Синхрофазотрон, рис.3								
		I	2	3	4	5	6	7	I	2	4	I	2	3	4	5	6	7	8	9
P_1	Спектрометр Боннера	9,1	3,8	49	0,35	0,35	5,3	1,1	29,0	24,0	3,3	68	53	25	12	80	13	51	110	220
P_2	$^{12}C(x, n)^{11}C$	28	≤0,5	100	-	-	-	≤0,3	89	62	2,9	≤10	≤10	≤10	9,0	15	1,2	≤0,4	≤0,4	5
P_3	^{9}Li - камера	2,8	1,8	13	0,25	0,08	4,2	-	19,0	9,4	-	-	-	-	8,1	2,4	-	-	-	
I_1	REM-2	20	4,2	64	0,45	0,14	5,7	-	98	73	-	-	-	-	110	21	-	-	-	
F		$29 \pm 8,5$	$4,7 \pm 0,6$	$110 \pm 4,4$	$0,52 \pm 0,08$	$0,29 \pm 0,15$	$7,6 \pm 1,9$	$1,1 \pm 0,3$	110 ± 10	80 ± 7	$6,2 \pm 1,0$	68 ± 12	53 ± 10	25 ± 10	21 ± 7	100 ± 10	$18 \pm 3,5$	51 ± 12	110 ± 13	230 ± 28
ИФЭИ	P_H^* , нейтроны	270	1,1	1800	0,56	0,56	3,3	6,9	1800	1500	180	92	110	62	370	435	51	74	1700	700
	P_T , γ -излучение	3,4	2,0	9,1	0,20	-	3,3	≤0,5	12	12	4,6	18	14	7,0	-	14	≤2,4	7,0	17	18
	P_{St} , нуклоны, мезоны	15	0,1	100	-	-	-	2,0	110	70	10	-	-	-	-	19	≤2	-	-	-
	$\frac{dP_H}{dt}$ скорректированная мощность дозы	25	-	220	-	-	-	3,0	160	400	21	-	-	-	-	120	>16	-	-	-
		32	-	120	-	-	-	1,5	170	100	31	45	43	19	15	48	-	23	91	100
	$P_H^* - P_{St}$	47	-	220	-	-	-	3,5	280	230	41	-	-	-	-	67	-	-	-	-
	$P_H / P_1 + P_2$	7,3	0,3	12	1,6	1,6	0,62	6,3	15	18	29	1,4	2,0	2,5	18	4,6	3,6	1,4	16	3,1
	$P_H^* / P_1 + P_2$	0,70	-	1,5	-	-	-	2,7	1,4	4,6	3,4	-	-	-	-	1,2	1,1	-	-	-
	$P_H^* / P_1 \cdot P_2$	1,3	-	1,4	-	-	-	3,2	2,3	2,6	6,6	≥0,7	≥0,8	≥0,8	≥0,7	0,7	-	≥0,5	≥0,9	≥0,4

*) Ошибка при определении P_H не превышает ±13%.

**) Коррекция выполнена на основе представления спектра нейтронов как суммы равновесного и рассеянного спектров (метод I см. текст).

-**) Коррекция выполнена на основе анализа треков в эмульсии (метод II, см. текст).

представим в виде

$$D_p = D(E > 20 \text{ МэВ}) + D(E < 20 \text{ МэВ}) = D(E > 20) \cdot (1 + \psi), \quad (2)$$

где
$$\psi = \frac{D(E < 20)}{D(E > 20)}$$

Определяемая с помощью дозиметра ИФКн "кажушаяся" доза равна:

$$D_{\text{каж}} = D_{\text{рас}} + D_p, \text{ каж} = D_{\text{рас}} + D(E > 20) \cdot \eta,$$

где
$$\eta = \frac{D_{\text{р. каж}}}{D(E > 20)}$$

Отсюда
$$D_{\text{рас}} = D_{\text{каж}} - D(E > 20) \cdot \eta. \quad (3)$$

Подставляя (3) и (2) в (1), получим

$$D = D_{\text{каж}} - D(E > 20) [\eta - 1 - \psi]. \quad (4)$$

Экспериментальные значения η и ψ в соответствии с данными таблицы 4 будут:

для равновесного, "жесткого" спектра (т.т. I, 3 рис. I)

$$\psi = 0,4 \pm 0,1; \quad \eta = 18,5 \pm 1,1,$$

для промежуточных условий (т.т. I+9 рис. 3)

$$\psi = 8 \pm 3; \quad \eta = 35 \pm 7.$$

Для "мягкого" спектра [$D(E > 20 \text{ МэВ}) \leq 0,05 D(E > 0)$], очевидно, поправка не имеет смысла.

$$D_{\text{мин}} = D(E > 20 \text{ МэВ}) (1 + \psi), \text{ а } D_{\text{макс}} \text{ определяется из } \eta_{\text{мин}} \text{ и } \psi_{\text{макс}}.$$

В том случае, когда из (4) получаем $D < D_{\text{мин}}$ за наиболее близкое к истинному значение дозы принимается

$$D = \frac{D_{\text{мин}} + D_{\text{макс}}}{2}.$$

При таком подходе к определению истинной дозы нейтронов дозу частиц высоких энергий $D(E > 20 \text{ МэВ})$ принимаем равной дозе, измеренной по числу звезд (N_{36}) с числом лучей ≥ 3 в эмульсии.

$$D_{36} = KN$$

Коэффициент "K" был определен экспериментально;

$$K = 0,34 \text{ бар} \cdot \text{зв}^{-1} \cdot \text{мм}^2.$$

2-ой метод коррекции показаний ИФКн основан на анализе треков в эмульсии. Все треки делили на 3 группы:

- 1) треки, насквозь пересекающие эмульсию - N_1 ,
- 2) треки, начало и конец которых лежат в эмульсии - N_2 ,
- 3) треки, один конец которых лежит в эмульсии - N_3 .

Для оценки дозы нейтронов $D(E_H < 20 \text{ МэВ})$ в случае заметного вклада в дозу релятивистских нуклонов ($> 5\%$), рекомендуется воспользоваться суммой треков $N_2 + N_3$ и обычным градуировочным коэффициентом. Полная доза нейтронов и нуклонов находится как сумма составляющих.

$$D = D(E_H < 20 \text{ МэВ}) + D_{36}, \text{ бар}$$

В таблице 5 для некоторых точек вблизи синхротрона и синхрофазотрона приведены результаты измерений, скорректированные в соответствии с обоими методами. Из приведенных данных следует:

- а) коррекция показания ИФКн позволяет получить более близкие к истинным значения дозы нейтронов и нуклонов,
- б) целесообразно в случае необходимости использовать оба вида коррекции.

При этом максимальное завышение доз в случае промежуточного между "жестким" и "мягким" спектрами < 5 раз.

По почернению пленки, используемой для регистрации нейтронов, можно оценить дозу облучения гамма-излучением в случаях, когда рентгеновская пленка на денситометре не просматривается. Почерне-

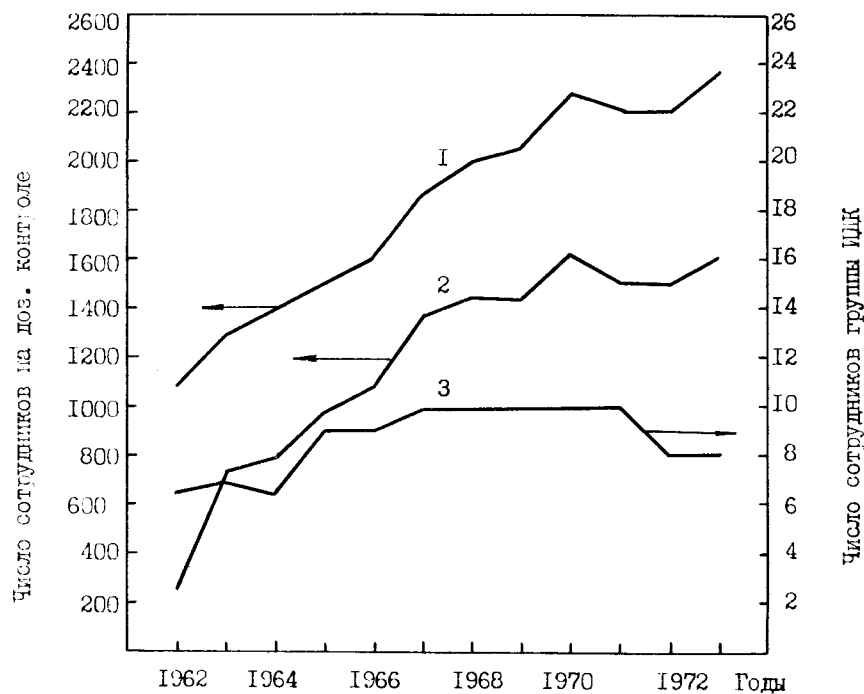


Рис.4. Изменение во времени числа контролируемых и контролирующих сотрудников:

- 1- число сотрудников, стоящих на индивидуальном дозиметрическом контроле;
- 2- число сотрудников, контролируемых по нейтронам;
- 3 - число сотрудников ОРБ, занятых индивидуальным дозиметрическим контролем.

ние этой пленки, как и рентгеновских пленок, сильно зависит от энергии излучения. Однако, если известно, что имело место облучение только жестким гамма-излучением, пленка с ядерной эмульсией "К" позволяет измерить дозу до нескольких сот рентген. Воспроизводимость результатов при этом в пределах 30+40%.

На индивидуальном дозиметрическом контроле в ОИИИ находится в настоящее время 2400 человек. Рост численности сотрудников, состоящих на дозиметрическом контроле, с 1962 по 1973 г. представлен на рис.4. На этом же рисунке представлено изменение числа сотрудников Отдела радиационной безопасности, занятых индивидуальным контролем. В течение многих лет в ОИИИ проводился ежемесячный индивидуальный контроль. Однако тщательный анализ условий работы сотрудников, уровней их облучения в течение многих лет и проведенные работы по определению регрессии показаний рентгеновских пленок и пленок, используемых для определения дозы нейтронов, в течение 6 месяцев, позволили перевести почти 70% сотрудников на трехмесячный контроль. В среднем дозы, получаемые сотрудниками ОИИИ в течение последних лет, остаются небольшими. Изменение во времени среднегодовых доз по лабораториям для разных групп облучающихся, объединенных одинаковыми (с точки зрения радиационной обстановки) условиями работы, представлено на рис.5 и 6. Из рисунков видно, что наибольшему облучению подвергаются сотрудники отдела синхротрона и сотрудники, участвующие в ремонте узлов ускорителя. Получаемая ими доза (>90%) обусловлена гамма-излучением наведенной активности камеры и отдельных узлов ускорителя. Для других групп сотрудников (60+70)% полной дозы облучения также обусловлено гамма-излучением.

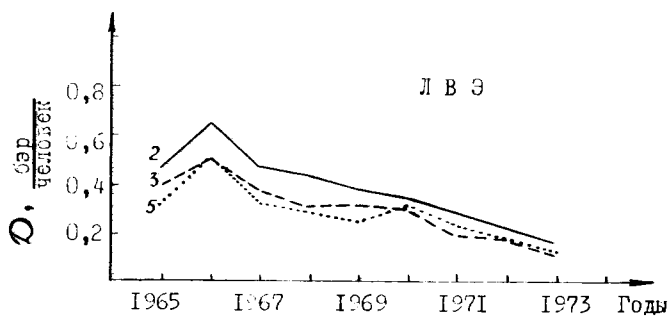
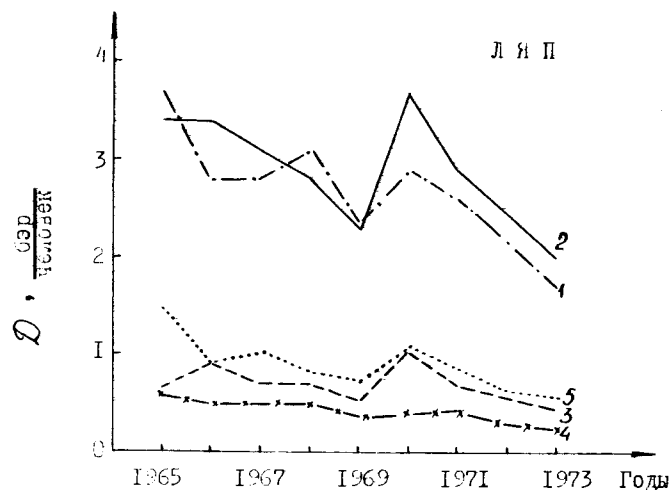


Рис.5. Среднегодовые дозы облучения персонала Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории высоких энергий ОИЯИ:
 1- ремонтные группы, 2- отделы эксплуатации, 3- научные отделы, 4 - отдел ядерной спектроскопии и радиохимии, 5- вспомогательные группы.

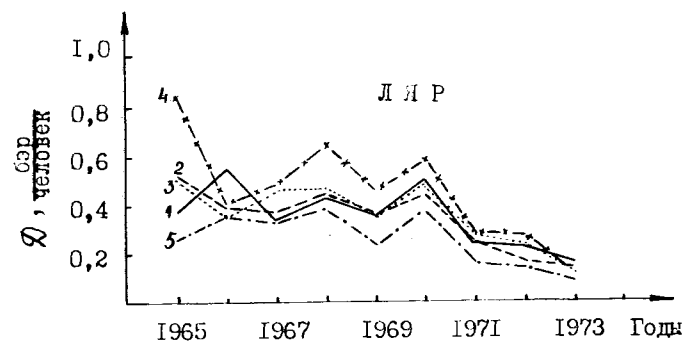
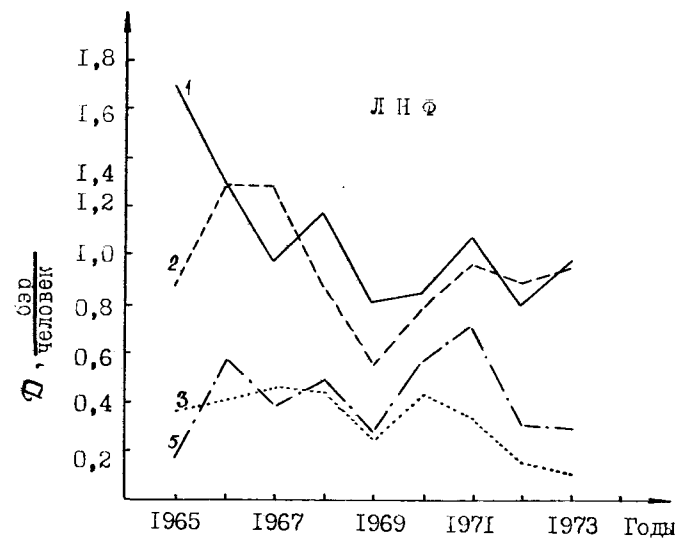


Рис.6. Среднегодовые дозы облучения персонала Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ:
 1- ремонтные группы, 2- отделы эксплуатации, 3- научные отделы, 4- радиохимический отдел, 5- вспомогательные группы.

Заключение

Используемые в ОИЯИ индивидуальные дозиметры ИФКи позволяют измерять дозу, обусловленную гамма-излучением и нейтронами широкого энергетического интервала вблизи ускорителей в местах, где вклад суммарную дозу релятивистских нуклонов не превышает 5%, с ошибкой не более 50% в сторону завышения показаний (точки 2,4,5,6 на рис. I). В тех случаях, когда вклад релятивистских нуклонов в дозу значителен, соответствующая корректировка показаний ИФКи позволяет оценить полную дозу нейтронов и нуклонов с завышением в 2-3 раза.

Среднегодовые дозы облучения сотрудников ОИЯИ гораздо ниже предельно допустимых. Так, в течение последних лет почти 90% сотрудников ОИЯИ, состоящих на дозиметрическом контроле, получают дозы не более 1 бэр в год.

Авторы приносят благодарность В.Алейникову, А.Череватенко, Ю.Мокрову за помощь при измерениях, Л.Смирновой и лаборантам группы ИДК - за просмотр пленок и получение данных индивидуального контроля.

Литература

1. В.Ф. Козлов. "Фотографическая дозиметрия ионизирующего излучения", Атомиздат (1964).
2. Messplatz für Thermolumineszenzdosimetrie VA-M-30 VEB VAKUTRONIK WIB DRESDEN.
3. Я.С. Золин, В.Н. Лебедев, М.И. Салацкая, Атомная энергия т 13, 467 (1962).
4. М.Г. Гелев и др., ОИЯИ, I6-6243, Дубна (1972).
5. В.Е. Алейников и др., Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes", p.363, IAEA, Vienna (1973).
6. В.Е. Алейников и др., ОИЯИ, P16-6791, Дубна (1972).
7. В.Н. Лебедев, М.И. Салацкая. Дозиметрические и радиометрические методики" стр.282, Москва (1965).
8. М. Зельчинский, К. Жарновецкий. Neutron Monitoring p.125, IAEA, Vienna (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
6 августа 1974 года.