

Г-61

29/XII-68



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ОТДЕЛ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

P16 - 4765

**В.Т.Головачик, И.М.Дмитриевский, М.М.Комочков,
В.Н.Лебедев, Ю.Д.Лысак, Ю.В.Семенов, В.В.Фролов,
А.П.Череватенко**

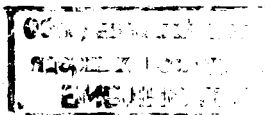
**ТКАНЕВАЯ ДОЗИМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ УСКОРИТЕЛЯМИ НА ВЫСОКИЕ
ЭНЕРГИИ**

Дубна 1989

P16 - 4765

**В.Т.Головачик, И.М.Дмитриевский, М.М.Комочков,
В.Н.Лебедев, Ю.Д.Лысак, Ю.В.Семенов, В.В.Фролов,
А.П.Череватенко**

**ТКАНЕВАЯ ДОЗИМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ УСКОРИТЕЛЯМИ НА ВЫСОКИЕ
ЭНЕРГИИ**



В настоящее время во многих лабораториях мира большое внимание уделяется исследованиям по тканевой дозиметрии полей излучения смешанного состава. Определены два метода решения этой задачи: 1) традиционный, заключающийся в раздельном определении вкладов от каждого компонента излучения в эквивалентную дозу; 2) метод, связанный с определением эквивалентной дозы без разделения на составляющие на основе использования зависимости коэффициента качества излучения от линейных передач энергии (ЛПЭ). Оба метода не исключают друг друга. В частности, первый чрезвычайно полезен при исследовании защиты, когда требуется информация о компонентном составе излучения. Второй метод обладает определенными преимуществами при решении практических задач радиационной безопасности, так как сводит измерения многочисленных физических параметров смешанного излучения к двум основным: поглощенной дозе и эффективным ЛПЭ.

В настоящей работе излагаются результаты исследований, связанных со вторым из упомянутых методов.

Сферический тканееквивалентный пропорциональный счетчик для измерения спектра доз по ЛПЭ был предложен Росси^{1/}. Среди других приборов, в которых использована зависимость того или иного эффекта от ЛПЭ^{2,3/}, счетчик типа Росси дает наиболее детальную информацию, отличается наибольшей точностью и поэтому может быть использован при разработке и градуировке других дозиметрических приборов.

Пропорциональный счетчик имеет сферическую форму, выбор которой обусловлен появляющейся при этом изотропией чувствительности, а также простотой расчета спектров импульсов. Конструкция и технология изготовления счетчика подробно описаны в работе /4/.

В работе /1/ показано, что в сферическом пропорциональном счетчике, помещенном в однородном поле излучения, распределение импульсов от частиц с определенным значением ЛПЭ будет иметь треугольную форму. Это справедливо в предположении, что путь ионизирующих частиц в газовой полости прямолинеен и величина ЛПЭ частиц при прохождении через полость сохраняется неизменной. Для однородного потока косвенно ионизирующего излучения поток вторичного излучения вдоль любого направления внутри счетчика также однороден. Учитывая, что при наличии частиц, имеющих различные значения ЛПЭ, спектр импульсов будет представлять суперпозицию отдельных треугольных распределений, можно перейти от наблюдаемого спектра импульсов к распределению доз по ЛПЭ:

$$D(L) dL = \frac{1,6 \cdot 10^{-1}}{2\pi r^2} \left(\frac{L}{h} \right) \left[-h^3 \frac{d}{dh} \frac{Q(h)}{h} \right] dh, \quad 2rL = kh_{\max} = 2rqh_{\max} \quad (1)$$

где: $D(L)dL$ - поглощенная доза в мкрад на интервал dL ; L - величина ЛПЭ частиц в кэВ/мкм ткани; r - радиус счетчика в см; h - номер канала в амплитудном спектре импульсов; $Q(h)$ - число импульсов на единичный интервал h ; k и q - градуировочные коэффициенты; h_{\max} - номер канала, соответствующего максимальным потерям энергии частицы в счетчике в том случае, когда частица пересекает счетчик по диаметру.

Для практических расчетов удобнее соотношение (1) привести к виду:

$$D(L) = 1,02 \cdot 10^{-3} h Q(h) [1-S], \quad (2)$$

где $S = \frac{d \lg Q(h)}{d \lg h}$ - тангенс угла наклона кривой $Q(h)$, изображенной в двойном логарифмическом масштабе. Формула получена для счетчика радиусом 5 см.

Один из способов обработки аппаратного спектра иллюстрируется на рис.1. При этом: $D(L) = 1,02 \cdot 10^{-3} h^2 \frac{a}{\Delta h}$. (3)

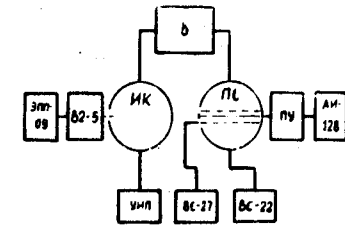
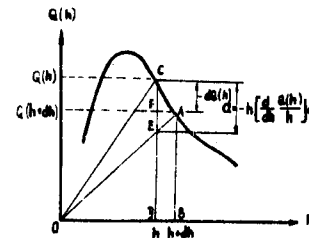


Рис.1. К методу обработки аппаратного спектра. Рис.2. Блок-схема экспериментальной установки: ПС - пропорциональный счетчик; ИК - ионизационная камера; В - система газового наполнения счетчика и камеры.

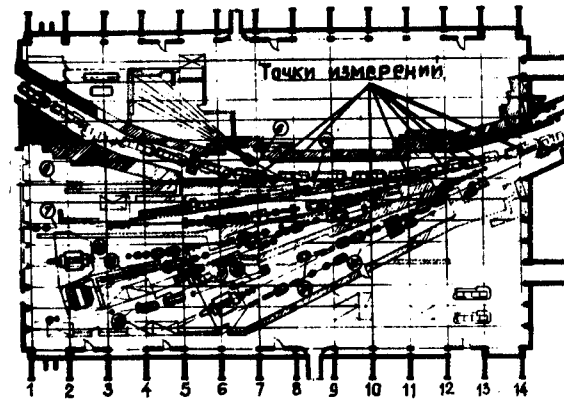


Рис.3. Схема экспериментального зала протонного синхротрона ИФВЭ.

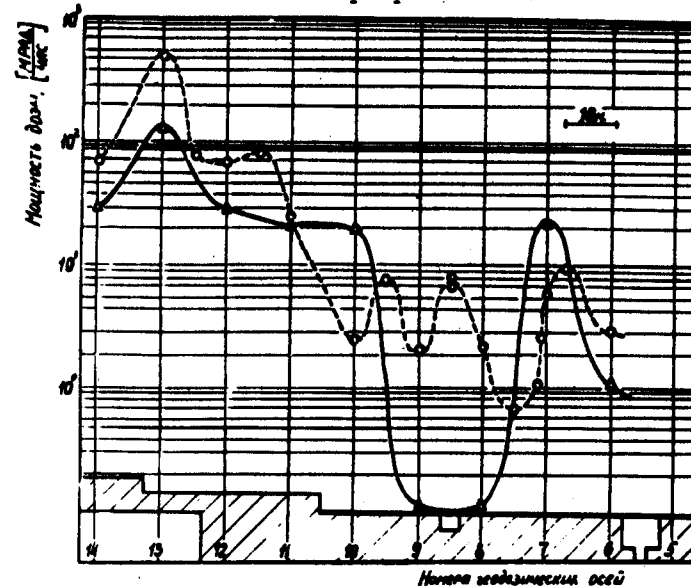


Рис.4. Распределение поглощенной дозы над верхней защитой кольца ускорителя в экспериментальном зале. Сплошная линия - при работе мишени 2-го канала; пунктир - при работе мишени 4-го канала.

Величину относительной погрешности при определении $D(L)$, обусловленную статистической ошибкой $Q(h)$ в соответствующем интервале, легко получить, используя равенство (3):

$$\epsilon [D(L)] = 2h \epsilon [Q(h)]. \quad (4)$$

Можно определить средний коэффициент качества непосредственно из аппаратного спектра аналитическим путем, не прибегая к построению распределения $D(L)$ и графическому дифференцированию. Линеаризуя зависимость коэффициента качества в i -ом интервале ЛПЭ

$$K_i(L) = 1 + a_i L + b_i \quad (5)$$

и используя соотношение (1), получим:

$$D(\bar{K}-1) = 4,08 \cdot 10^{-8} q^2 \sum_{i=1}^4 a_i \alpha_i + 3,06 \cdot 10^{-8} q \sum_{i=1}^4 b_i \beta_i. \quad (6)$$

Здесь: D - поглощенная доза, измеренная тканезквивалентной ионизационной камерой; $\alpha_i = \sum_{m=h_{i-1}}^{h_i} m^2 Q(m)$, $\beta_i = \sum_{m=h_{i-1}}^{h_i} m Q(m)$; a_i и b_i - коэффициенты линеаризации. Интервалы линейности функции $K(L)$ и значения коэффициентов a_i и b_i приводятся в работе^{5/}, там же детально изложены методы обработки спектров.

При проведении измерений счетчик работал в режиме без прокачки с пропановым или метановым наполнением. До и после экспозиции проводилась градуировка счетчика с помощью коллимированного α -источника ^{210}Po , предусмотренного в конструкции счетчика. Смещение α -пика за 5-6 часов не превышало 1%. Для проверки правильности работы счетчика снимается спектр ЛПЭ изотропного α -источника, расположенного строго на внутренней поверхности счетчика, при правильной работе счетчика спектр имел прямоугольную форму в пределах 10% ошибки. При измерении спектра ЛПЭ $\text{Po}-\text{Be}$ -источника средний коэффициент качества нейтронов этого источника получился равным 7,4, что хорошо согласуется с результатами измерений, выполненных другими авторами^{6/}.

Основные измерения на ускорителях выполнены при следующем режиме счетчика: давление пропана 20 мм рт.ст.; потенциал на внешнем электроде 800 в, на корректирующей спирали - 500 в.

Ионизационные камеры изготовлены из тканезквивалентной токопроводящей пластмассы. Для измерений в широком диапазоне мощностей доз был изготовлен набор из семи камер с чувствительными газовыми объемами от 0,01 до 1000 см³. Камеры наполнялись тканезквивалентной смесью газов: метана (64%), углекислого газа (32%) и азота (3,5%). Для измерения глубинных распределений использовалась специальная координатная установка, позволяющая дистанционно перемещать ионизационную камеру в пространстве фантома и обеспечивающая точность воспроизведения положения камеры не хуже 1 мм^{7/}. В качестве фантомов использовались цилиндрические ёмкости, выполненные из плексигласа и наполненные тканезквивалентной жидкостью следующего состава: вода - 56,9% по весу, мочевины - 7,6%, глицерин - 28,4%, сахара - 7,1%. Размеры фантомов приведены в таблице №1.

Таблица №1

№ фантома	1	2	3	4	5	6	7
Часть тела	Голова	Шея	Торс	Бедро	Руки	Ноги от бедер до колен	Ноги ниже колен
Высота цилиндра (см)	20	10	40	20	60	40	40
Поперечное сечение (см)	Эллипс 19x14	∅ 13	Эллипс 30x20	Эллипс 36x20	∅ 10	∅ 12	∅ II

Градуировка ионизационных камер проводилась с помощью калиброванных источников α - и γ -излучения, активность которых известна с точностью $\pm 6\%$. Отдельно рассчитывалась по теории Брегга-Грея градуировочная постоянная, которая для камеры объемом 1000 см^3 оказалась равной $3,3 \cdot 10^{-13} \text{ а·сек/мкрад}$. Расхождение между вычисленной и экспериментальной величинами не превосходит 2% .

Импульсный характер излучения ускорителей требует применения специальной методики измерения ионизационного тока, поскольку большинство известных методик разработано для постоянных или слабоменяющихся токов. Мы использовали метод измерения импульса тока по скорости нарастания импульса напряжения на входной емкости электрометра. Метод дает возможность получать информацию о мощности дозы в импульсе излучения и одновременно о длительности этого импульса^{18/}. Для измерения тока применялся милливольтметр-электрометр с динамическим конденсатором на входе. Полная емкость системы камера - входная цепь электрометра-составляла $18 \pm 0,5 \text{ пф}$, входное сопротивление электрометра равнялось 10^{12} ом . В качестве регистрирующего прибора использовался низкочастотный запоминающий осциллограф или самопишущий потенциометр. Блок-схема установки представлена на рис.2.

Определение коэффициента качества и эквивалентной дозы в полях рассеянного излучения протонного синхротрона ИФВЭ на 70 Гэв. Схема участка экспериментального зала приведена на рис.3. Здесь же указаны места размещения внутренних мишеней ускорителя, обозначены опорные геодезические оси и точки, в которых при измерениях устанавливался счетчик. Одновременно со счетчиком работала ионизационная камера объемом 500 см^3 , предназначенная для измерений полной поглощенной дозы. Эта же камера использовалась в качестве монитора, фиксирующего на ленте самописца все изменения в режиме работы ускорителя во время экспозиции. Результаты измерений коэффициента качества над верхней защитой кольца ускорителя вдоль равновесной орбиты приведены в таблице 2. На рис.4 показаны распределения поглощенной дозы для двух различных режимов, нормированные на интенсивность первичного пучка $10^{12} \text{ прот/цикл}$. На рис.5 показаны результаты измерений мощности поглощенной дозы над верхней защитой кольца ускорителя в его поперечном сечении. На рис.6 приведен характерный спектр $D(L)$, снятый над верхней защитой на геодезической оси №13.

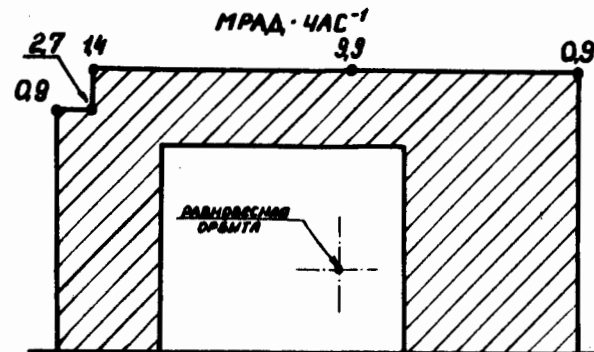


Рис.5. Поглощенная доза над верхней защитой кольца ускорителя в его поперечном сечении.

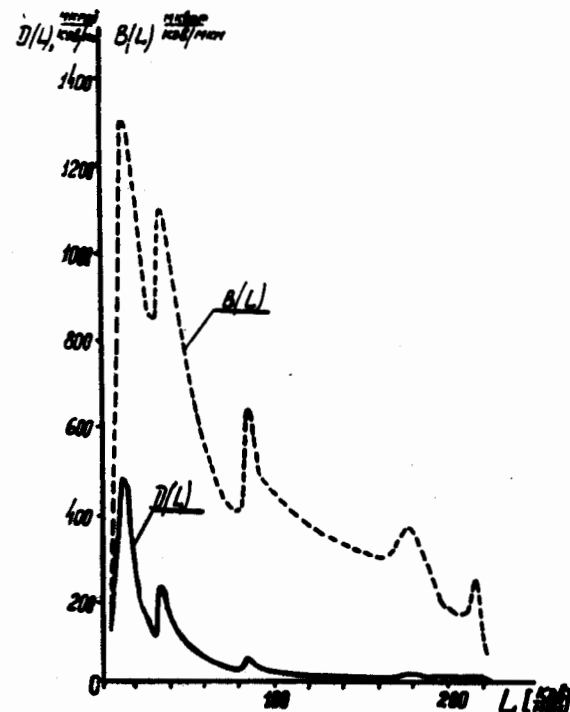


Рис.6. Распределение поглощенной дозы $D(L)$ и эквивалентной дозы $B(L)$ по ЛПЭ на синхротроне ИФВЭ; 13-я геодезическая ось.

Таблица №2

№ п/п	Место намерения	Толщина верхней защиты (м)	Режим работы ускорителя		Средний КК	
			Энергия Гэв	Распределение ин- тенсивности по ка- налам	В диапазоне L	В ДИАПАЗОНЕ $L > 35 \frac{КЭВ}{ММ ТК}$
1.	Геодезическая ось № I4	2,0	35	№2(50%), №4(50%)	1,2	5,3
2.	"- № I3	1,0	35	№2(50%), №4(50%)	1,4	5,0
3.	"- № I3	2,0	70	№2(25%), №4(70%) Ko(5%)	2,5	6,5
4.	"- № I3	2,0	70	№2(40%), №4(40%) Ko(20%)	1,65	3,0
5.	"- № I2	3,0	35	№2(50%), №4(50%)	1,5	6,3
6.	Между осями №I3 и № I2	1,0	70	№2(100%)	1,2	4,0
7.	Геодез.ось № II	3,0	70	№2(50%), №4(50%)	1,3	3,2
8.	"- № II	3,0	52	№2(50%), №4(50%)	1,6	5,0
9.	"- № II	4,0b	52	№2(50%), №4(50%)	4,5	4,7
10.	"- № I0	2,0	70	№2(50%), №4(50%)	1,8	5,9
11.	"- № I0	2,0	70	№2(40%), №4(40%) Ko(20%)	1,5	4,1
12.	"- № 7	2,0	70	№6(100%)	3,0	4,1
13.	Доз. канал h=4м	-	70	№6(10%), №2(90%)	1,1	6,5
14.	Доз. канал h=1,5м	-	70	№6(10%), №2(90%)	1,0	7,5

Из приведенных результатов видно, что средний коэффициент качества имеет для большинства точек низкие значения, не превосходящие 2, что свидетельствует о значительном вкладе в эквивалентную дозу компонентов излучения с низким значением коэффициента качества. Эти результаты находятся в согласии с результатами, опубликованными по ускорителю БНЛ^{/9/}. В ЦЕРН'e^{/10/} отмечены более высокие коэффициенты качества.

Измерения глубинных распределений в полях рассеянного излучения синхроциклотрона ОИЯИ (схема зала синхроциклотрона приведена на рис.7) проводились с помощью описанной выше установки в фантоме №4 (см. таблицу №1), установленном на высоте 75 см от пола. На рис.8 и 9 показаны глубинные распределения поглощенной тканевой дозы вдоль большой оси эллиптического сечения фантома, измеренные в точках 21 и 2, указанных на схеме синхроциклотрона (рис.7). Полученные распределения имеют максимум на глубине 2-5 см от поверхности фантома. Наличие этого максимума нельзя объяснить характером распределения глубинных доз от нейтронов^{/11/}. Данные по спектру в точке 1 имеются в работе^{/12/}. Нами была проведена оценка глубинного распределения от захватного γ -излучения, возникающего в материалах защиты и деталях ускорителя. Спектр падающего на фантом γ -излучения, оцененный из спектра захватного γ -излучения для железа^{/13/} и кривых ослабления^{/15/}, оказался подобным спектру тормозного излучения с граничной энергией 8 Мэв. Глубинное распределение такого излучения по данным^{/16/} имеет максимум на глубине порядка 2 см. Смещение максимума в область больших глубин связано с деформацией глубинного распределения за счет вклада тепловых и промежуточных нейтронов, обнаруживающих максимум на глубине 4-5 см. Наличие высокого максимума, в 2-3 раза превышающего поверхностную дозу на глубине залегания кроветворных органов (критического органа 1-ой группы), необходимо учитывать при оценке радиационной опасности.

Рис.7. Схема синхротрона ОИЯИ и расположение точек измерений.

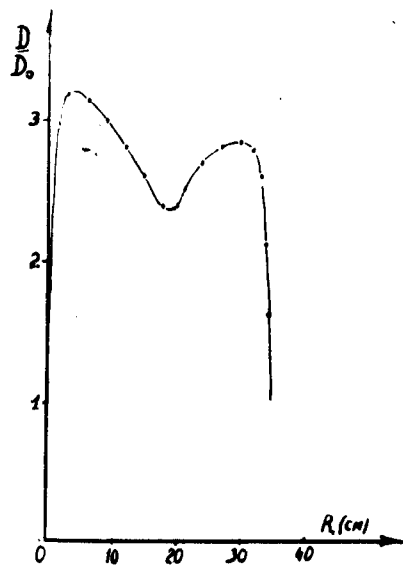
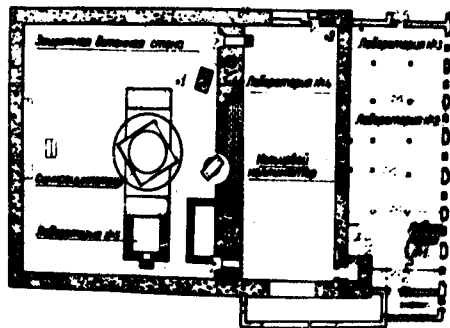


Рис.8. Глубинное распределение поглощенной дозы, снятое вдоль большой оси фантома в точке 1.

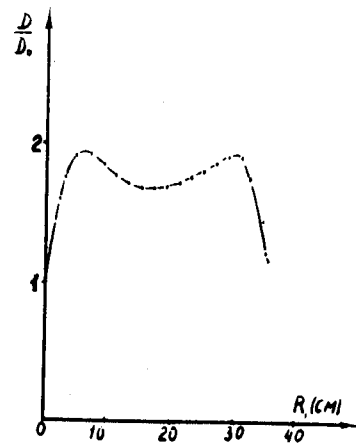


Рис.9. Глубинное распределение поглощенной дозы, снятое вдоль большой оси фантома в точке 2.

Литература

1. Н.Н.Росси, W.Rosenzweig. Radiology. 64, N3, 404 (1955).
2. М.Зельчинский, В.Лебедев, М.Салацкая. ПТЭ №6, 73 (1964).
3. S.Pszona. Institut Bodan Jadrowych, Report, N653, IAD (1966).
4. И.Дмитриевский и др. Сб. Вопросы дозиметрии и защиты. Вып. 9 (1969).
5. В.Головачик и др. Сб. Вопросы дозиметрии и защиты. Вып.10 (1969).
6. D.Nachtigall, Health Physics. 13, N2, 213 (1967).
7. В.Головачик и др. Сб. Вопросы дозиметрии и защиты. Вып.9 (1969).
8. В.Головачик и др. Сб. Вопросы дозиметрии и защиты. Вып. 10 (1969).
9. L.Phillips et al. Brookhaven Symposium on Accelerator Radiation Dosimetry and Experience, 144 (1965).
10. J.Baarli et al., Там же, 103 (1965).
11. W.Snyder et al. Brit J. Radial., 28, 331, 342 (1955).
12. Л.Кимель и др. Сб. Вопросы дозиметрии и защиты. Вып. 8 (1968).
13. Л.Кимель и др. Справочник "Защита от ионизирующих излучений". (1966).
14. О.Лейпунский. Распространение гамма-квантов в веществе. М (1966)
15. Б.Исаев и др. Атомная энергия. 6. 57 (1959) Вып.1.

Рукопись поступила в издательский отдел

31 октября 1969 года.