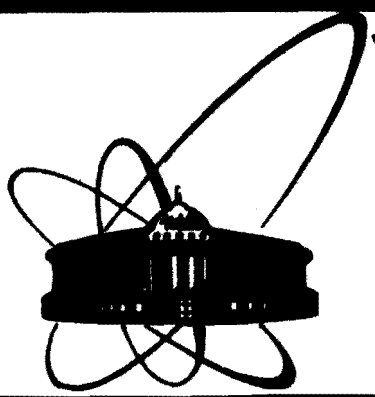


87-935



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

B-125

16-87-935

**Р.Вагнер*, В.П.Зорин, П.Йироушек*, О.Л.Климов,
И.Коварж*, А.Г.Молоканов, Г.В.Мицын, Й.Новотны***

**ФИЗИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
НА ГАММА-АППАРАТЕ РОКУС-М**

* Институт радиационной дозиметрии ЧСАН, Прага

1. ВВЕДЕНИЕ

В процедурной кабине №6 клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ установлен аппарат для дистанционной гамма-терапии — РОКУС-М, который может применяться как для статического, так и для ротационного и ротационно-конвергентного облучения глубоко расположенных опухолей.

Этот аппарат с источником излучения ^{60}Co с активностью 6000 Кюри, будет использован для сочетанного (облучение протонами + гамма-терапия), либо самостоятельного лечения, в случае выхода из строя ускорителя или оборудования протонного канала. Кроме того, аппарат удобен для проведения радиобиологических исследований и калибровки дозиметрических приборов в качестве вторичного эталона.

Для корректного решения задачи планирования облучения, сводящейся к тому, чтобы создать в облучаемом объеме тканей оптимальное, с точки зрения лечащего врача, распределение дозы, необходимо знание радиационных и технических параметров установки^{1/}. Дозиметрические данные на радиоактивность источника, указанные в паспорте, не могут служить основой расчета мощности дозы в рабочем пучке излучения, так как в паспортную активность источника следует вносить поправки на самопоглощение излучения в источнике и поглощение в конструктивных элементах, на наличие рассеянного излучения и т.д. Поэтому необходимо измерять мощность дозы в некоторой калибровочной (опорной) точке в стандартных условиях. Эта мощность дозы характеризует интенсивность гамма-излучения пучка, контролирует его постоянство и должна служить основой для расчета поглощенных доз при гамма-терапии. В качестве калибровочной (опорной) величины удобно использовать мощность экспозиционной дозы в воздухе на расстоянии 75 см от источника (центр ротации) при площади пучка $S = 10 \times 10 \text{ см}$, так как в атласах карт изодоз и методических рекомендациях имеются таблицы коэффициентов, позволяющих перейти от этих "стандартных" к любым другим условиям облучения.

Целью настоящей работы явилось проведение измерения некоторых радиационных параметров установки РОКУС-М, а именно:

- а) мощности экспозиционной дозы в опорной точке,
- б) распределения экспозиционной дозы вдоль оси пучка излучения,
- в) зависимости экспозиционной дозы от размеров поля облучения,
- г) влияния стола гамма-установки на экспозиционную дозу,
- д) поглощенной дозы,
- е) распределения дозы в воздухе в направлениях, перпендикулярных оси пучка установки,
- ж) распределения дозы в водной среде.

Кроме того, проведена градуировка двух клинических дозиметров 27012.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерение мощности экспозиционной дозы было осуществлено путем переноса величины экспозиционной дозы первичного эталона, находящегося в Институте радиационной дозиметрии в Праге, при помощи воздухоэквивалентной ионизационной камеры Викторин В-415. Ионизационная камера была соединена с электрометром ВЙК-4, которым производится абсолютное измерение ионизационного тока или заряда с высокой чувствительностью и точностью. Градуировка ионизационной камеры предварительно проведена на первичном эталоне — ^{60}Co в ИРД ЧСАН. (Та же ионизационная камера была использована при всех международных сравнениях первичного эталона).

Все основные измерения проведены в воздухе в геометрии свободного пространства. Стандартные условия измерений: вертикальный пучок, расстояние источник — центр детектора — 750 мм, т.е. 388 мм от наружной поверхности выходного окна радиационной головки; размеры радиационного поля 10x10 см на расстоянии 750 мм. В таких условиях расстояние от стола до центра детектора составляло около 0,8 м, расстояние детектора от пола около 1,2 м, так что влияние на дозу рассеянных от пола вторичных фотонов и электронов пренебрежимо мало. Абсолютная величина экспозиционной дозы была определена также на расстоянии 1,0 м от источника. Относительные измерения проводились при помощи ионизационных камер ВАК-251 или ВАК-252.1 с колпачками из воздухоэквивалентной пластмассы, толщина которых обеспечивала электронное равновесие в детекторе. Для измерения ионизационного тока или заряда использовался электрометр ВЙК-4. Температура воздуха измерялась лабораторным термометром, атмосферное давление — при помощи механического барометра.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Мощность экспозиционной дозы

Величина экспозиционной дозы или мощность экспозиционной дозы измерялась в течение одной недели при различных значениях температуры воздуха и атмосферного давления. Измеренный ионизационный ток был поправлен на температуру, давление и влажность воздуха при помощи уравнения:

$$J_k = J_M \frac{T + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101,325}{p} \cdot 0,997, \quad (1)$$

где T — температура воздуха в градусах С; p — давление воздуха в кПа; поправочный коэффициент 0,997 на влажность воздуха применялся при условиях относительной влажности от 30% до 70%^{1/2}. Мощность экспозиционной дозы была вычислена из уравнения:

$$\dot{X} = \frac{J_k}{N_x}, \quad (2)$$

где N_x — экспозиционный градуировочный коэффициент ионизационной камеры; J_k — ток ионизации, поправленный на температуру, давление, влажность воздуха и насыщение.

В табл. 1 приведены результаты измерений мощности экспозиционной дозы на расстоянии 75 см и 100 см от торца источника гамма-аппарата РОКУС-М, полученные в ноябре 1986 года.

Таблица 1

Измеренные в ноябре 1986 года величины экспозиционной дозы на гамма-аппарате РОКУС-М (размеры поля 10x10 см)

Дата измерения	Расстояние (см)	Ток* (А)	Мощность экспозиционной дозы* (А·кг ⁻¹)
11.11.86.	75	6,4535 Е-9	5,3208 Е-4
11.11.86.	75	6,4708 Е-9	5,3351 Е-4
12.11.86.	75	6,4417 Е-9	5,3112 Е-4
14.11.86.	75	6,4498 Е-9	5,3178 Е-4
17.11.86.	75	6,4569 Е-9	5,3237 Е-4
Средняя величина			5,3217 Е-4 ± 0,17%
11.11.86.	100	3,6263 Е-9	2,9898 Е-4
11.11.86.	100	3,6347 Е-9	2,9967 Е-4
12.11.86.	100	3,6277 Е-9	2,9910 Е-4
14.11.86.	100	3,6303 Е-9	2,9931 Е-4
17.11.86.	100	3,6298 Е-9	2,9927 Е-4
Средняя величина			2,9927 Е-4 ± 0,09%

* На 1 декабря 1987 года.

В табл. 2 представлены результаты аналогичных измерений, проведенных в октябре 1987 года, а также сравнение результатов обоих лет. Все данные пересчитаны на 1 декабря 1987 года. В пределах погрешностей измерений результаты совпали.

Таблица 2

Измеренные в октябре 1987 года величины экспозиционной дозы на гамма-аппарате РОКУС-М (размеры поля 10x10 см) и сравнение с измерениями 1986 года. Все величины пересчитаны на 01.12.87 года.

Дата измерения	Расстояние (см)	Ток (А)	Мощность экспоз. дозы (А · кг ⁻¹)
27.10.87.	75	6,4292 E-9	5,2995 E-4
27.10.87.	75	6,4168 E-9	5,2892 E-4
27.10.87.	75	6,4212 E-9	5,2929 E-4
27.10.87.	75	6,4304 E-9	5,3004 E-4
28.10.87.	75	6,4177 E-9	5,2898 E-4
Средняя величина			5,2943 E-4 ± 0,04%
Отклонение от измерений 1986 года			-0,51%
27.10.87.	100	3,6260 E-9	2,9850 E-4
28.10.87.	100	3,6083 E-9	2,9704 E-4
Средняя величина			2,9777 E-4 ± 0,2%
Отклонение от измерений 1986 года			-0,50%

Значение мощности экспозиционной дозы в опорной точке $P = 5,294 \text{ E-4 A} \cdot \text{кг}^{-1}$ на 01.12.87 г. или выход экспозиционной дозы $2,978 \text{ E-4 A} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ были приняты как основные величины для гамма-аппарата РОКУС-М №104.

Эксперименты показали, что в пределах ошибок измерения экспозиционная доза для горизонтального и вертикального пучков одинакова.

2. Зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния

Зависимость экспозиционной дозы от расстояния была изучена в диапазоне от 60 до 160 см при постоянной величине радиационного поля (10x10 см). Все данные нормировались относительно мощности экспозиционной дозы в опорной точке, т.е. на расстоянии $z_0 = 75 \text{ см}$. Зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния можно описать при помощи модифицированного квадратичного закона:

$$X(z) \approx \frac{1}{(z + \Delta)^2},$$

где $\Delta = -0,0033 \pm 0,0005 \text{ м}$.

где $\dot{X}(z_0, 10)$ — мощность экспозиционной дозы в опорной точке при стандартных условиях, t_0 — время измерения мощности экспозиционной дозы $\dot{X}(z_0, 10)$, $T_{1/2}$ — период полураспада ^{60}Co , функция K_E определяется из уравнения (5).

Формула (6) позволяет проводить расчеты мощности экспозиционной дозы с суммарной погрешностью $\pm 2\%$ на уровне доверительной вероятности 95%.

4. Влияние стола

Зависимость экспозиционной дозы от расстояния до стола была изучена в пределах от 5 до 70 см. Как видно из рис. 3, рассеянные фотоны и вторичные электроны дают заметный вклад в экспозиционную дозу вблизи поверхности стола. При расстояниях более, чем 30 см, стол практически не влияет на величину мощности экспозиционной дозы.

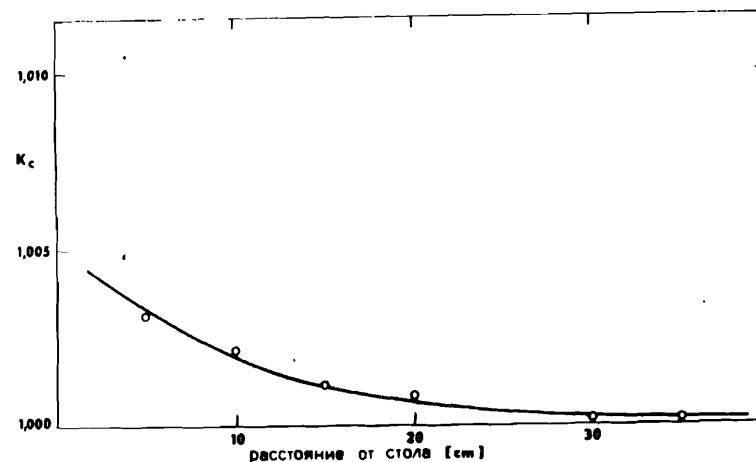


Рис. 3. Функция поправки экспозиционной дозы на расстояние детектора от стола.

5. Поглощенная доза

Поглощенная доза была измерена в фантоме из органического стекла при помощи ионизационной камеры VAK-251, отградуированной в пучке первичного эталона. Измерения поглощенной дозы проводились на глубине 47 мм органического стекла, т.е. на глубине, эквивалентной $5,5 \text{ г/см}^2$, при расстоянии от источника до поверхности фантома 75 см. Размер поля облучения на поверхности фантома был равен $10 \times 10 \text{ см}$. Поглощенная доза рассчитана по формуле:

$$D(10, z_0)_m = N_g \cdot S_v^m \cdot M_u \cdot p_u, \quad (7)$$

где N_g — массовый градуировочный коэффициент ионизационной камеры ($\text{Гр} \cdot \text{Кл}^{-1}$); M_u — измеренный заряд или ток, поправленные на насыщение, температуру, давление и влажность воздуха; S_v^m — отношение тормозных способностей органического стекла и воздуха; P_u — поправочный коэффициент на возмущение радиационного поля ионизационной камерой.

Поглощенную дозу в воде можно вычислить из поглощенной дозы в органическом стекле по формуле:

$$D(10, z_0)_{\text{H}_2\text{O}} = D(10, z_0)_m \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m^{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\text{ESC}), \quad (8)$$

где $(\mu/\rho)_m^{\text{H}_2\text{O}}$ — отношение массовых коэффициентов поглощения энергии для воды и органического стекла, (ESC) — коэффициент, учитывающий различное рассеяние в воде и органическом стекле. Результаты измерения поглощенной дозы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения поглощенной дозы в разных фантомах на глубине $5,5 \text{ г/см}^2$ вещества. (Расстояние источник — поверхность фантома 75 см, мощность поглощенной дозы пересчитана на 01.12.87.

Фантом	Глубина (мм)	Мощность поглощенной дозы ($\text{Гр} \cdot \text{мин}^{-1}$)
Органическое стекло	47	0,963
Вода	55	0,979

Зависимость величины поглощенной дозы от размера поля облучения изображена на рис. 4, где коэффициент K_D представляет собой отношение поглощенной дозы в поле с эквивалентным размером C к поглощенной дозе в поле со стандартными размерами $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$. Эту кривую можно описать с коэффициентом корреляции 0,997 при помощи уравнения:

$$K_D = a_1 - a_2 \exp(-a_3 C), \quad (9)$$

где $a_1 = 1,0595$, $a_2 = 0,414$ и $a_3 = 0,194$, C — эквивалентный размер поля.

Поглощенная доза для любого эквивалентного поля C в любой момент времени t в фантоме из органического стекла на глубине 47 мм или в водном фантоме на глубине 55 мм равняется:

$$D(C, t) = D(10, z_0) \cdot K_D \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_0) \ln 2}{T_{1/2}}\right), \quad (10)$$

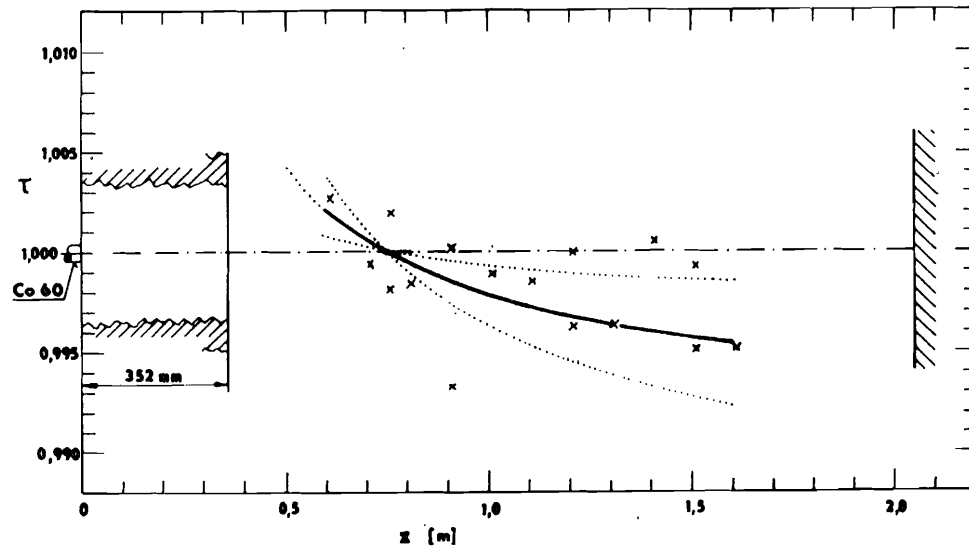


Рис. 1. Функция поправочного коэффициента модифицированного квадратичного закона, описывающего зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния источник-детектор.

Мощность экспозиционной дозы на любом расстоянии z можно рассчитать по известной величине экспозиционной дозы в опорной точке z_0 при помощи уравнения:

$$X(z) = X(z_0) \left(\frac{z_0 + \Delta}{z + \Delta}\right)^2 \quad (3)$$

В данном случае удобно воспользоваться выражением:

$$X(z) = X(z_0) \cdot \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \cdot \tau(z), \quad (4)$$

где $\tau(z) = \left(\frac{1 + (\Delta/z_0)}{1 + (\Delta/z)}\right)^2$ — поправочная функция.

Зависимость функции $\tau(z)$ от расстояния показана на рис. 1 сплошной линией, пунктирные линии ограничивают интервал 95% доверительной вероятности, крестиками обозначены экспериментальные данные.

3. Зависимость мощности экспозиционной дозы от размеров поля облучения

Зависимость мощности экспозиционной дозы от размеров поля изучалась при двух значениях расстояния от источника (75 см и 100 см)

Таблица 2

Измеренные в октябре 1987 года величины экспозиционной дозы на гамма-аппарате РОКУС-М (размеры поля 10x10 см) и сравнение с измерениями 1986 года. Все величины пересчитаны на 01.12.87 года.

Дата измерения	Расстояние (см)	Ток (А)	Мощность экспоз. дозы ($A \cdot kg^{-1}$)
27.10.87.	75	6,4292 E-9	5,2995 E-4
27.10.87.	75	6,4168 E-9	5,2892 E-4
27.10.87.	75	6,4212 E-9	5,2929 E-4
27.10.87.	75	6,4304 E-9	5,3004 E-4
28.10.87.	75	6,4177 E-9	5,2898 E-4
Средняя величина			5,2943 E-4 \pm 0,04%
Отклонение от измерений 1986 года			-0,51%
27.10.87.	100	3,6260 E-9	2,9850 E-4
28.10.87.	100	3,6083 E-9	2,9704 E-4
Средняя величина			2,9777 E-4 \pm 0,2%
Отклонение от измерений 1986 года			-0,50%

Значение мощности экспозиционной дозы в опорной точке $P = 5,294 E-4 A \cdot kg^{-1}$ на 01.12.87 г. или выход экспозиционной дозы $2,978 E-4 A \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$ были приняты как основные величины для гамма-аппарата РОКУС-М №104.

Эксперименты показали, что в пределах ошибок измерения экспозиционная доза для горизонтального и вертикального пучков одинакова.

2. Зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния

Зависимость экспозиционной дозы от расстояния была изучена в диапазоне от 60 до 160 см при постоянной величине радиационного поля (10x10 см). Все данные нормировались относительно мощности экспозиционной дозы в опорной точке, т.е. на расстоянии $z_0 = 75$ см. Зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния можно описать при помощи модифицированного квадратичного закона:

$$X(z) = \frac{1}{(z + \Delta)^2},$$

где $\Delta = -0,0033 \pm 0,0005$ м.

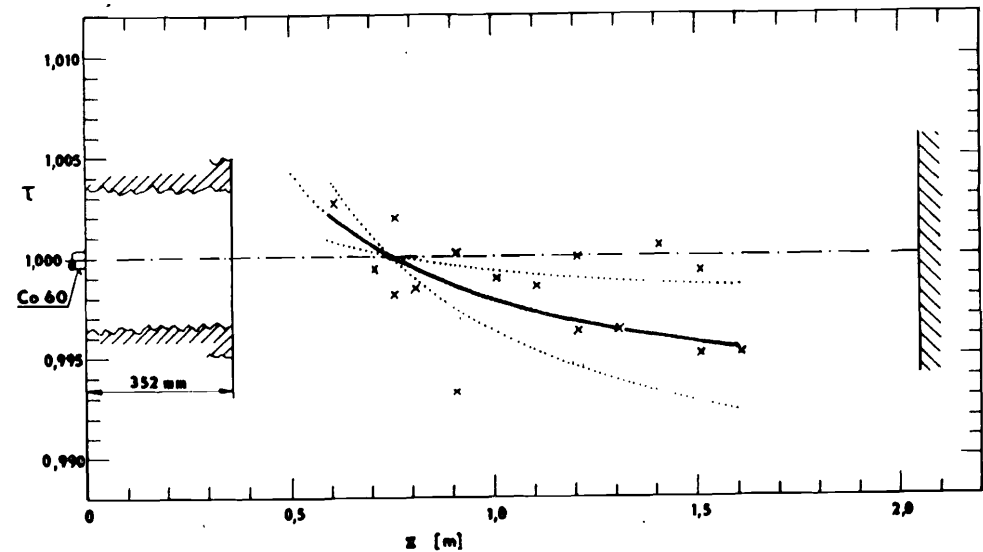


Рис. 1. Функция поправочного коэффициента модифицированного квадратичного закона, описывающего зависимость мощности экспозиционной дозы от расстояния источник-детектор.

Мощность экспозиционной дозы на любом расстоянии z можно рассчитать по известной величине экспозиционной дозы в опорной точке z_0 при помощи уравнения:

$$X(z) = X(z_0) \left(\frac{z_0 + \Delta}{z + \Delta} \right)^2. \quad (3)$$

В данном случае удобно воспользоваться выражением:

$$X(z) = X(z_0) \cdot \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \cdot r(z), \quad (4)$$

где $r(z) = \left(\frac{1 + (\Delta/z_0)}{1 + (\Delta/z)} \right)^2$ — поправочная функция.

Зависимость функции $r(z)$ от расстояния показана на рис. 1 сплошной линией, пунктирные линии ограничивают интервал 95% доверительной вероятности, крестиками обозначены экспериментальные данные.

3. Зависимость мощности экспозиционной дозы от размеров поля облучения

Зависимость мощности экспозиционной дозы от размеров поля изучалась при двух значениях расстояния от источника (75 см и 100 см)

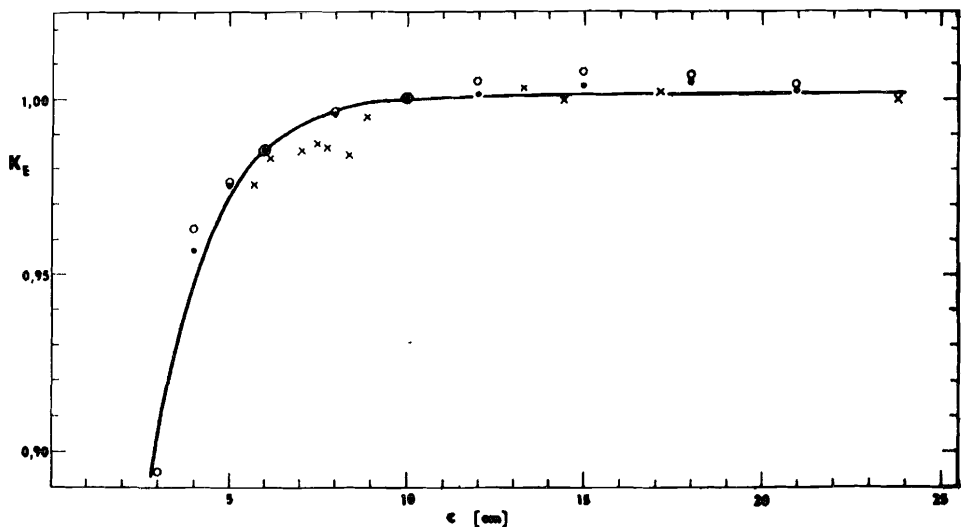


Рис. 2. Зависимость отношения мощности экспозиционной дозы эквивалентного поля облучения к мощности дозы стандартного поля (10x10 см) от размеров эквивалентного поля. * — квадратные поля на расстоянии $z = 75$ см от источника, x — прямоугольные поля, $z = 75$ см, o — квадратные поля, $z = 100$ см.

для квадратных и прямоугольных полей. На рис. 2 изображена кривая зависимости отношения мощностей экспозиционных доз $K_E = \dot{X}(C)/\dot{X}(10)$ от размера C . Здесь $\dot{X}(C)$ — мощность экспозиционной дозы эквивалентного поля размера C , $\dot{X}(10)$ — мощность экспозиционной дозы для стандартного поля $s = 10 \times 10$ см. Эквивалентный размер поля вычисляется при помощи уравнения Стерлинга: $C = 2 \cdot A \cdot B / (A + B)^{1/2}$, где A и B — длины сторон прямоугольного поля.

Величину поправочного коэффициента K_E можно вычислить при помощи уравнения:

$$K_E = b_1 - b_2 \exp(-b_3 \cdot C) \quad (5)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0,96$. В уравнении (5) величины констант $b_1 = 1,00141$, $b_2 = 0,59779$, $b_3 = 0,60516$.

Для квадратных полей совпадение экспериментальных и расчетных данных очень хорошее, для прямоугольных полей, особенно с отношением A/B больше, чем 4, разница немного больше.

Мощность экспозиционной дозы для любого размера эквивалентного поля C на расстоянии z от источника в любое время t можно вычислить по формуле:

$$\dot{X}(z, C) = \dot{X}(z_0, 10) \cdot \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \cdot \tau(z) \cdot K_E \exp\left(\frac{(t - t_0) \cdot \ln 2}{T_{1/2}}\right), \quad (6)$$

где $\dot{X}(z_0, 10)$ — мощность экспозиционной дозы в опорной точке при стандартных условиях, t_0 — время измерения мощности экспозиционной дозы $\dot{X}(z_0, 10)$, $T_{1/2}$ — период полураспада ^{60}Co , функция K_E определяется из уравнения (5).

Формула (6) позволяет проводить расчеты мощности экспозиционной дозы с суммарной погрешностью $\pm 2\%$ на уровне доверительной вероятности 95%.

4. Влияние стола

Зависимость экспозиционной дозы от расстояния до стола была изучена в пределах от 5 до 70 см. Как видно из рис. 3, рассеянные фотоны и вторичные электроны дают заметный вклад в экспозиционную дозу вблизи поверхности стола. При расстояниях более, чем 30 см, стол практически не влияет на величину мощности экспозиционной дозы.

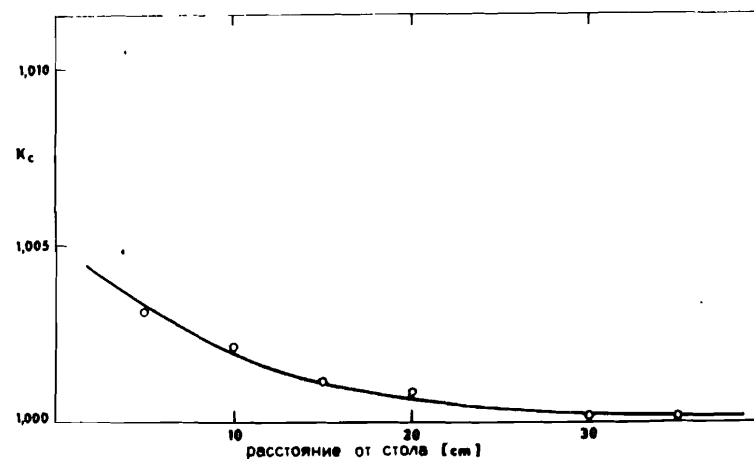


Рис. 3. Функция поправки экспозиционной дозы на расстояние детектора от стола.

5. Поглощенная доза

Поглощенная доза была измерена в фантоме из органического стекла при помощи ионизационной камеры ВАК-251, отградуированной в пучке первичного эталона. Измерения поглощенной дозы проводились на глубине 47 мм органического стекла, т.е. на глубине эквивалентной $5,5 \text{ г/см}^2$, при расстоянии от источника до поверхности фантома 75 см. Размер поля облучения на поверхности фантома был равен 10×10 см. Поглощенная доза рассчитана по формуле:

$$D(10, z_0)_m = N_g \cdot S_v^m \cdot M_u \cdot p_u, \quad (7)$$

где N_g — массовый градуировочный коэффициент ионизационной камеры ($\text{Гр} \cdot \text{Кл}^{-1}$); M_u — измеренный заряд или ток, поправленные на насыщение, температуру, давление и влажность воздуха; S_v^m — отношение тормозных способностей органического стекла и воздуха; p_u — поправочный коэффициент на возмущение радиационного поля ионизационной камерой.

Поглощенную дозу в воде можно вычислить из поглощенной дозы в органическом стекле по формуле:

$$D(10, z_0)_{\text{H}_2\text{O}} = D(10, z_0)_m \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m^{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\text{ESC}), \quad (8)$$

где $(\mu/\rho)_m^{\text{H}_2\text{O}}$ — отношение массовых коэффициентов поглощения энергии для воды и органического стекла, (ESC) — коэффициент, учитывающий различное рассеяние в воде и органическом стекле. Результаты измерения поглощенной дозы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения поглощенной дозы в разных фантомах на глубине $5,5 \text{ г/см}^2$ вещества. (Расстояние источник — поверхность фантома 75 см, мощность поглощенной дозы пересчитана на 01.12.87.

Фантом	Глубина (мм)	Мощность поглощенной дозы ($\text{Гр} \cdot \text{мин}^{-1}$)
Органическое стекло	47	0,963
Вода	55	0,979

Зависимость величины поглощенной дозы от размера поля облучения изображена на рис. 4, где коэффициент K_D представляет собой отношение поглощенной дозы в поле с эквивалентным размером C к поглощенной дозе в поле со стандартными размерами 10 см x 10 см. Эту кривую можно описать с коэффициентом корреляции 0,997 при помощи уравнения:

$$K_D = a_1 - a_2 \cdot \exp(-a_3 C), \quad (9)$$

где $a_1 = 1,0595$, $a_2 = 0,414$ и $a_3 = 0,194$, C — эквивалентный размер поля.

Поглощенная доза для любого эквивалентного поля C в любой момент времени t в фантоме из органического стекла на глубине 47 мм или в водном фантоме на глубине 55 мм равняется:

$$D(C, t) = D(10, z_0) \cdot K_D \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_0) \ln 2}{T_{1/2}}\right), \quad (10)$$

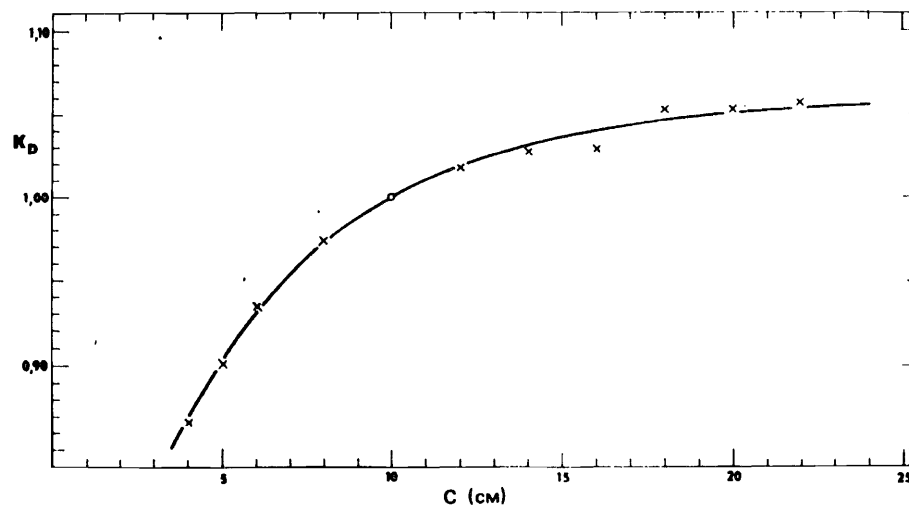


Рис. 4. Зависимость отношения поглощенной дозы эквивалентного поля облучения к поглощенной дозе стандартного поля ($10 \times 10 \text{ см}$) от размеров эквивалентного поля.

где t_0 — 1 декабря 1987 года; $T_{1/2}$ — период полураспада ^{60}Co ; величина $D(10, z_0)$ для фантомов приведена в табл. 3.

Поглощенную дозу в водном фантоме в любое время t для эквивалентного размера поля C на глубине B фантома можно также вычислить из известного значения мощности экспозиционной дозы $X(10, z_0)$ при помощи уравнения:

$$D(C, z) = X(10, z_0) \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \cdot r(z) \cdot K_E \cdot K \cdot \text{TAP}(C, B) \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_0) \ln 2}{T_{1/2}}\right), \quad (11)$$

где K — коэффициент перевода экспозиционной дозы в поглощенную; $\text{TAP}(C, B)$ — ткане-воздушное отношение для эквивалентного размера поля C на глубине B фантома (таблицы приведены в работе [3]), остальные символы определены выше.

6. Градуировка клинических дозиметров

В пучке гамма-аппарата РОКУС-М была проведена градуировка двух клинических дозиметров 27012, применяемых для проведения абсолютных дозиметрических измерений на медицинских протонных пучках ЛЯП ОИЯИ. Градуировка осуществлялась путем сравнения измеренных клиническими дозиметрами величин экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы с аналогичными величинами, измеренными ионизационной камерой Викторин В-415.

Измерения проводились на расстояниях 75 см и 100 см от источника при размерах поля облучения 10x10 см.

Градуировочные коэффициенты F, представляющие собой отношения между величинами, измеренными градуируемыми клиническими дозиметрами, и величиной, измеренной стандартной ионизационной камерой Викторин В-415, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты градуировки клинических дозиметров типа 27012

Номер дозиметра	Номер камеры ВАК-253	Коэффициент F в режиме	
		мощность дозы	доза
31076	6182	1,010 ± 0,3%	0,950 ± 0,3%
31038	6217	1,006 ± 0,3%	0,981 ± 0,3%

4. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности измерений были вычислены при помощи метода, описанного в работе [4]. Суммарная погрешность на уровне доверительной вероятности 95% была рассчитана по формуле:

$$U_{95} = 1,13 \cdot [(2s)^2 + \sum_i a_i^2]^{1/2}, \quad (12)$$

где s — среднее квадратичное отклонение случайной компоненты погрешности (предполагается нормальное распределение); a_i — максимальная погрешность i-ой компоненты систематической погрешности (предполагается прямоугольное распределение).

Основные погрешности и их величины при измерении градуировочного коэффициента стандартной ионизационной камерой на первичном эталоне показаны в табл. 5. В табл. 6 приведены погрешности градуировки гамма-аппарата РОКУС-М в опорной точке.

Суммарная погрешность измерения в опорной точке гамма-аппарата РОКУС-М равна ± 1,3% на уровне доверительной вероятности 95%. Суммарная погрешность определения экспозиционной дозы на оси пучка на произвольном расстоянии от источника z для произвольного размера коллиматора C, вычисленная при помощи формулы (6), достигает ± 2% на уровне доверительной вероятности 95%. Вычисление поглощенной дозы при помощи уравнения (10) обеспечивает суммарную погрешность ± 2,5% на уровне доверительной вероятности 95%.

Таблица 5
Погрешности определения градуировочного коэффициента ионизационной камеры Викторин В-415 на первичном эталоне

Источник	a_i / \bar{y} или $2s/\bar{y}$
геометрический объем	0,2%
поправка на эффективный объем	0,2%
ослабление пучка в стенке камеры	0,2%
погрешность определения эффективной точки измерения	0,2%
поправка на электронное равновесие	0,1%
неоднородность пучка	0,1%
абсолютное измерение заряда (тока)	0,2%
поправка на насыщение	0,1%
поправка на плотность воздуха	0,2%
поправка на влажность воздуха	0,2%
погрешность абсолютной величины экспозиционной дозы первичного эталона	0,8%
суммарная погрешность	$U_{95} = \pm 1,10\%$

Таблица 6

Погрешность определения мощности экспозиционной дозы гамма-аппарата РОКУС-М

Источник погрешности	a_i / \bar{y} или $2s/\bar{y}$
измерение заряда (тока)	0,3%
поправка на плотность воздуха	0,2%
поправка на влажность воздуха	0,2%
поправка на насыщение	0,1%
измерение расстояния источник-камера	0,2%
долговременная стабильность	0,2%
неоднородность поля	0,1%
погрешность переноса экспозиционной дозы	$U_{95} = \pm 0,54\%$
суммарная погрешность градуировки гамма-аппарата РОКУС-М (табл. 5 и 6)	$U_{95} = \pm 1,23\%$

5. ФАНТОМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ГАММА-АППАРАТЕ РОКУС-М

1. Проверка распределения дозы в воздухе в направлениях, перпендикулярных оси пучка излучения

Эти измерения, проводимые в воздухе с помощью работающего на связи с ЭВМ изодозографа с миниатюрным полупроводниковым

детектором, дают ответ на следующие вопросы: нет ли искажения дозного поля конструктивными элементами радиационной головки, соответствует ли центр радиоактивного источника центру отверстия коллиматора, соответствует ли размер поля, указанный на шкале диафрагмы, положению 50% изодозы в воздухе, соответствует ли величина геометрической полутени расчетному значению.

На рис. 5, 6 показано распределение мощности дозы вдоль осей поля 10×10 см на расстоянии 75 см от источника. Симметричная форма дозных кривых с плато в центре поля указывает на то, что искажения дозного поля за счет поглощения в конструктивных элементах радиационной головки практически нет, центр источника не смещен относительно центра коллиматора. Размер поля, указанный на шкале диафрагмы, совпадает с положением 50% изодозы с точностью 2 мм, а величина полутени соответствует расчетной.

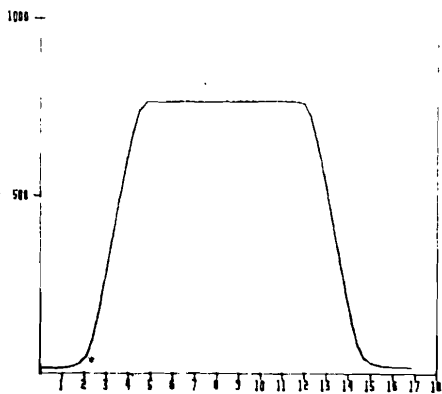


Рис. 5. Распределение мощности дозы вдоль продольной оси поля облучения $s = 10 \times 10$ см на расстоянии 75 см от источника.

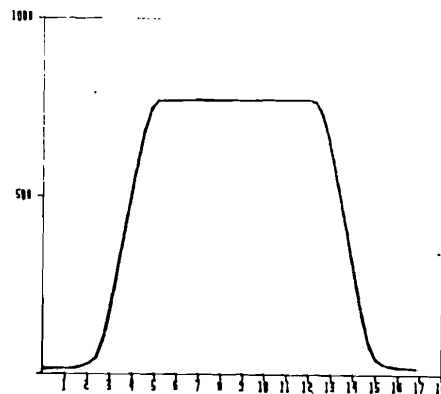
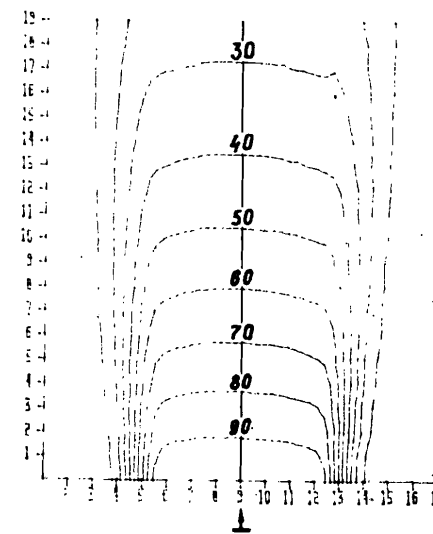


Рис. 6. Распределение мощности дозы вдоль поперечной оси поля облучения $s = 10 \times 10$ см на расстоянии 75 см от источника.

2. Распределение дозы в водной среде

На рис. 7 представлены результаты измерений дозы в водном фантоме, проведенные изодозографом. Размер поля, указанный на шкале диафрагмы, составляет 10×10 см, расстояние от источника до поверхности фантома, представляющего собой сосуд, имеющий форму параллелепипеда со стенками из органического стекла и заполненный водой, составляет 60 см. Здесь за 100% принята доза в точке, находящейся на глубине $1,5 \text{ г/см}^2$ вещества от поверхности фантома.

Рис. 7. Распределение мощности дозы в водном фантоме. Размеры поля на шкале диафрагмы $s = 10 \times 10$ см, расстояние до поверхности фантома — 60 см.



Таким образом, измерены основные физико-дозиметрические характеристики пучка излучения дистанционного гамма-терапевтического аппарата РОКУС-М, знание которых необходимо для корректного планирования лучевого лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патнер Т.Г., Фадеева М.А. *Техническое и дозиметрическое обеспечение дистанционной гамма-терапии*. М.: Медицина, 1982.
2. ICRU Rep. No.31: *Average Energy Required to Produce Ion Pair*. ICRU Pub. Washington, 1979.
3. Johns H.E., Cunningham J.R.: *The Physics of Radiology*. H.Thomas, Springfield, 1983.
4. Novotný J., Kovář I.: *Čs. standardisace*, 5, 237, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 декабря 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтринной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Вагнер Р. и др.
Физико-дозиметрические измерения
на гамма-аппарате РОКУС-М

16-87-935

Измерены мощность экспозиционной дозы в опорной точке, а также некоторые другие радиационные параметры дистанционного гамма-аппарата РОКУС-М, установленного в кабине №6 клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ. Проведена градуировка двух клинических дозиметров 27012 относительно первичного эталона, находящегося в Институте радиационной дозиметрии ЧСАН в Праге. Измеренные физико-дозиметрические характеристики источника излучения будут использоваться для планирования и проведения медико-биологических исследований.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Wagner R. et al.
Physico-Dosimetric Measurements
on the ROCUS-M Gamma Unit

16-87-935

The exposure radiation dose rate in the reference point and some other radiation parameters of ROCUS-M distant gamma unit set in Number 6 cabin of clinicophysical complex of JINR Laboratory of Nuclear Problems are measured. Two clinical dosimeters 27012 were graduated with respect to primary standard of the Prague Institute of Radiation Dosimetry. The measured physicosdosimetric characteristics of radiation source will be used for planning and carrying out medical-biological investigations.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987