

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

З-507

16-88-71

М.Зельчинский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ
ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ
В ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНОМ МАТЕРИАЛЕ
В ПОЛЕ СТАНДАРТНОГО
ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

1988

Детекторы, с помощью которых проводятся измерения поглощенной дозы в медицинских пучках частиц, требуют предварительной градуировки в стандартном поле излучения. Такое поле хорошо обеспечивается изотопным источником гамма-излучения. В секторе медицинских пучков Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ таким источником является изотоп кобальта-60 в установке РОКУС, предназначенной как для градуировочных целей, так и для проведения терапевтических облучений. Установка снабжена оптической системой, позволяющей точно определить положение детектора в фиксированной точке. Целью настоящей работы является возможно более точное определение дозиметрических параметров излучения в данной точке и ее окружении и, прежде всего, определение абсолютного значения мощности поглощенной дозы в стандартном тканезквивалентном материале.

Существует несколько способов достаточно точного определения дозы в избранном материале в поле гамма-излучения. Наиболее распространенными являются: 1) определение экспозиционной дозы путем сравнения с эталоном и последующий расчет поглощенной дозы путем применения коэффициентов истинного поглощения; 2) непосредственное измерение поглощенной дозы в воде или графите с помощью калориметра; 3) определение поглощенной дозы в материале стенок ионизационной камеры с известным объемом, на основе теории полости. В настоящей работе поглощенная доза определялась методом ионизационной камеры известного объема, позволяющим на сегодняшний день получить наиболее высокую точность и не требующим доступа к эталонному источнику излучения.

Согласно теории полости, для большого, по сравнению с размерами полости, пробега вторичных заряженных частиц, доза, поглощенная в материале электродов ионизационной камеры, является произведением дозы, поглощенной в газе полости, и отношения массовых тормозных способностей материала электродов и газа:

$$D_T = \frac{Wq}{e\rho V} S_g^T, \quad (1)$$

где W — энергия образования одной пары ионов в газе; q — заряд, образованный в газе между электродами камеры; e — заряд электрона; ρ — плотность газа; V — объем газа между электродами; S_g^T — отношение массовых тормозных способностей; D_T — поглощенная доза в материале электродов, в слое, прилегающем к газовой полости.

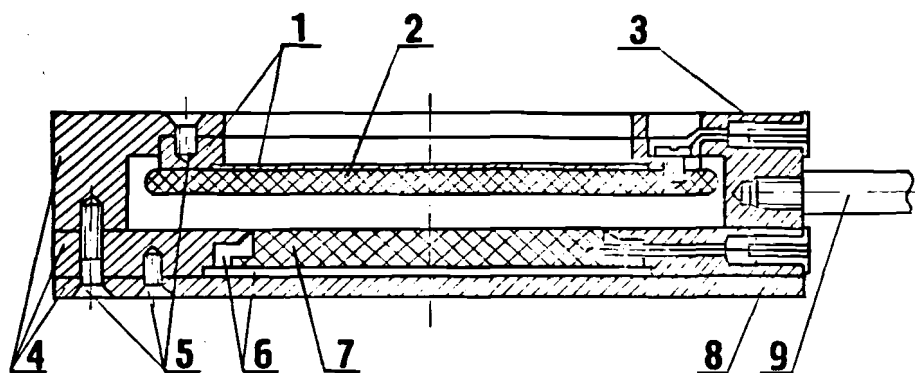


Рис. 1. Поперечный разрез эталонной ионизационной камеры. 1 — плексигласовый изолятор, 2 — полярирующий электрод, 3 — разъем, 4 — элементы каркаса, 5 — крепежные элементы, 6 — фторопластовый изолятор, 7 — измерительный электрод, 8 — разъем, 9 — ручка.

Как видно из представленной выше зависимости, для определения поглощенной дозы достаточно измерить абсолютное значение заряда и знать объем газа, в котором этот заряд образован. Значения остальных величин, выступающих в формуле (1), постоянны и достаточно хорошо известны.

В измерениях на установке РОКУС использована ионизационная камера (рис. 1), конструкция которой дала возможность точного определения чувствительного объема, так как обеспечены следующие факторы: 1) хорошая параллельность рабочих поверхностей электродов, прежде всего благодаря способу их обработки при единой установке на станок; 2) постоянство межэлектродного расстояния и других существенных геометрических размеров, вследствие жесткости конструкции; 3) пространственная равномерность напряженности электрического поля в рабочем объеме камеры и вблизи его границ, благодаря применению широкого охранного кольца и послесборочной обработки этого кольца совместно с поверхностью измерительного электрода; 4) постоянство электрического поля во времени путем установки изолятора полярирующего электрода вне поля зрения из рабочего объема; 5) хорошая гладкость поверхности электродов, произведенная тщательной полировкой; 6) минимализация мертвых объемов, произведенная соответствующему соединению сигнального кабеля, заливки парафинном паразитных воздушных промежутков и конструкции изолятора, отделяющего электрод от охранного кольца лишь узкой полоской, видимой из рабочего объема; 7) проведение точных геометрических измерений перед сборкой камеры, во время и после сборки. Достаточно большой объем камеры дает возможность пренебречь радиочувствительностью кабеля, темновым током электрометра и т.п. Атомный состав тканезквивалентного материала, окружающего рабочий объем, определен хими-

ческим анализом: процентное содержание водорода в материале составляет по весу 10,5%, углерода — 85,3%, азота — 3,2%, других элементов — 1%. Чувствительный объем камеры определен по геометрической формуле:

$$V = 0,25\pi(\Phi + b)^2 d, \quad (2)$$

где Φ — диаметр измерительного электрода; b — ширина поверхности изолятора, отделяющего измерительный электрод от охранного кольца; d — межэлектродное расстояние.

Значение основных параметров камеры и коэффициентов при расчете чувствительности камеры, приведены в табл. 1. Чувствительность определена как отношение заряда, образованного в газе чувствительного объема, к поглощенной дозе в стандартном тканезквивалентном материале ^{1/}:

$$A = \frac{e\rho V}{W_a S_a^{TE} k_h k_c}. \quad (3)$$

Таблица 1

Параметр	Символ	Значение	Ед. изм.	Погр. %
Диаметр измер. электрода	Φ	69,9	мм	0,08
Межэлектр. расстояние	d	8,16	мм	0,15
Толщина передней стенки	z	0,61	г/см ²	2
Чувствительный объем	V	31,8	см ³	0,3
Габаритный диаметр	Φ_r	152	мм	0,5
Максимальное напряжение	$U_{\text{макс}}$	1500	В	
Темновый ток	i_0	< 10	фА	
Эффективность собирания ионов при 1 кВ, 1 Гр/мин	f	99,8	%	0,05
Отношение тормозн. способн.	S_a^{TE}	1,142		0,4
Плотность сухого воздуха	ρ	1,1888	кг/м ³	0,02
Энергия ионообразования	W_a	33,97	эВ	0,2
Поправочн. коэфф. влажности	k_h	0,9973		0,1
Поправочн. коэфф. мат. камеры	k_c	1,0012		0,1
Чувствительность	A	0,979	мкКл/Гр	0,7

Численное значение чувствительности приведено к стандартным атмосферным условиям (температура 20 °С, давление 100 кПа, влажность 50%) и относится к гамма-излучению изотопа кобальта-60.

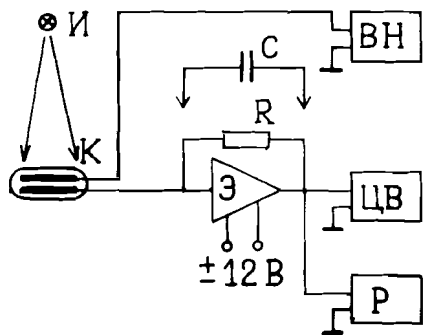


Рис. 2. Принципиальная схема измерения. К – эталонная ионизационная камера, И – радиоактивный источник излучения, ВН – источник поляризующего напряжения, Э – электрометр, ЦВ – цифровой вольтметр, Р – графический регистратор.

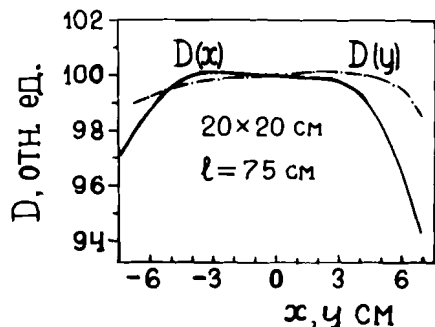


Рис. 4. Распределение мощности дозы вдоль осей облучаемого поля.

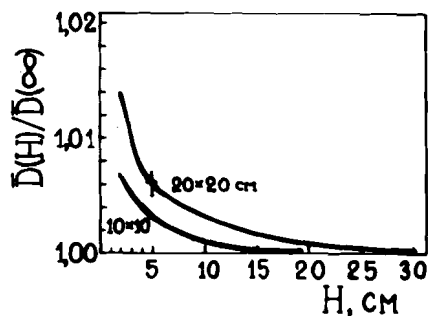


Рис. 5. Влияние излучения, обратно рассеянного столом.

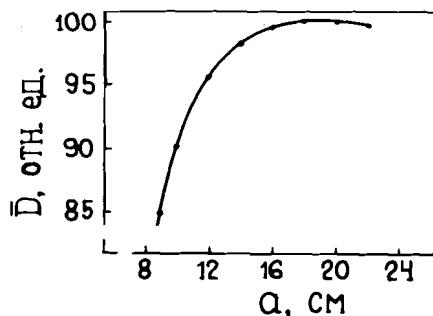


Рис. 3. Зависимость средней мощности дозы от размера стороны квадратного облучаемого поля.

При измерениях на установке РОКУС использована простая схема, представленная на рис. 2.

С целью правильного выбора условий абсолютного измерения была проведена серия относительных измерений. Зависимость тока ионизационной камеры от размеров облучаемого поля показана на рис. 3. Распределение мощности дозы по двум осям внутри облучаемого поля, снятое с помощью малогабаритного алмазного детектора, представлено на рис. 4. Из рисунков видно, что среднее (по площади камеры) значение мощности дозы не критично к точности установки размера поля при полях, больших чем 16x16 см, а равномерность дозы внутри облучаемого поля обеспечивается с точностью 0,5% лишь в центральной части, диаметром около половины стороны квадрата облучаемого поля. Влияние обратно рассеянного излучения от стола, на котором устанавливалась камера, показано на рис. 5. Из рисунка видно, что при расстояниях между камерой и столом, больших, чем 25 см, влияние обратного рассеяния не превышает 0,05%, но при меньших расстояниях стано-

вится уже ощутимым и зависимым от поля облучения. Формирование электронного равновесия, определенное с помощью тонкостенной ионизационной камеры, показано на рис. 6. Видно, что для обеспечения равновесия на расстоянии 75 см от центра источника, необходимая толщина стенки камеры составляет 0,4 г/см². Проверка постоянства произведения мощности дозы и квадрата расстояния показала, что эффективный центр источника смещен на 3 мм ближе к облучаемому объекту, по сравнению со световой отметкой расстояния 75,0 см. Проверено отсутствие (с точностью 0,05%) влияния длины кабеля, соединяющего камеру с электрометром (5÷25 м), изменения напряжения питания электрометра (±10%) и изменения температуры помещения (13 ÷ 20 °С), в котором находились электрометр и цифровые вольтметры.

Абсолютные измерения проводились при положении камеры 5 см над столом, при поле облучения 20x20 см в точке, определяемой световой отметкой, находящейся на расстоянии 38,8 см от поверхности выходного окна установки РОКУС. Заряд, поступающий с камеры, собирался на полистироловых конденсаторах, абсолютное значение емкости которых хорошо известно, либо протекал через сопротивление, абсолютное значение которого было определено с помощью вышеупомянутых емкостей и секундомера, сверенного в течение длительного периода с точными часами. Для определения заряда \dot{q} , образующегося в единице времени в чувствительном объеме камеры в стандартных атмосферных условиях, использовались соответствующие поправочные коэффициенты:

$$\dot{q} = \frac{u_R}{f \cdot R} k_{TP} k_{TV} k_t k_p, \quad (4)$$

где u_R – напряжение, считываемое на выходе электрометра; R – рабочее сопротивление; f – эффективность сбора ионов (определялась методом экстраполяции обратного значения тока как функции обратного квадрата напряжения); $k_{TP} = p_0 T / p T_0$ – поправочный коэффициент плотности воздуха; T – температура воздуха в камере; p – атмосферное давление; T_0, p_0 – стандартные температура и давление; k_{TV} – поправочный коэффициент температурного расширения рабочего объема, приводящий объем к температуре 20°С; k_t – поправочный коэффициент радиоактивного распада источника, относящий значение тока камеры на 31 декабря 1987 г.; k_p – поправочный коэффициент

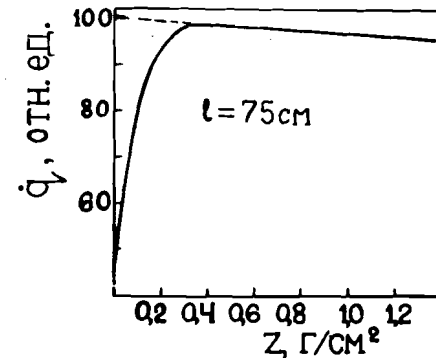


Рис. 6. Зависимость тока камеры от толщины стенки.

поляризации, приводящий ток камеры при отрицательной поляризации к среднему току при обеих поляризациях.

Проведено 25 отсчетов напряжения u_R в течение 15 ч. Произведение $u_R k_{TP}$ наносилось на график в функции времени. Среднее значение этого произведения в установившемся режиме, а также значения других величин, выступающих в формуле (4), представлены в табл. 2.

Результаты определения дозиметрических параметров в градуировочном пункте установки РОКУС приведены в табл. 3. Все данные определены на 31 декабря 1987 г. Основной параметр — мощность дозы в тканезквивалентном материале, усредненная по чувствительному объему камеры в условиях измерения — определен по формуле (5) согласно данным, приведенным в табл. 1 и 2.

Таблица 2

Параметр	Значение	Единицы	Погрешность, %
$\overline{u_R k_{TP}}$	7461	мВ	0,02 случ. 0,2 систем.
R	335,5	МОм	0,2
f	0,9988		0,1
k_t	0,8778		0,02
k_{TV}	1,0043		0,2
k_p	1,003		0,1
\dot{q}	19,68	нА	0,4
k_0	1,0008		0,1
$k_{\text{погл.}}$	1,0185		0,3
$k_{\text{расс.}}$	0,973		0,6
$k_{\text{ст}}$	0,9934		0,05
μ_{TE}^a	0,9076		0,3
g	0,004		5

Таблица 3

Параметр	Значение	Единицы	Погрешность, %
\dot{D}	1,20	Гр/мин	0,8
\dot{D}_0	1,201	—''—	0,9
\dot{K}_{TE}	1,181	—''—	1,2
\dot{K}_{H_2O}	1,192	—''—	1,3
K_a	1,072	—''—	1,3
X	525,6	мкА/кг	1,2

$$\dot{D} = \dot{q} / A. \quad (5)$$

Мощность дозы в центральной точке дана с учетом распределения, представленного на рис. 4:

$$\dot{D}_0 = k_0 \dot{D}. \quad (6)$$

Керма в тканезквивалентном материале определена посредством учета влияния поглощения и рассеяния излучения в камере, а также обратного рассеяния от стола:

$$K_{TE} = k_{\text{погл}} k_{\text{расс}} k_{\text{ст}} D_0. \quad (7)$$

Керма в других материалах пропорциональна отношению массовых коэффициентов истинного поглощения. В частности, керма в воздухе:

$$K_a = K_{TE} \mu_{TE}^a. \quad (8)$$

Экспозиционная доза рассчитана по формуле

$$X = \frac{K_a e}{W_a} (1 - g), \quad (9)$$

где g — доля энергии электронов, освобождаемых гамма-квантами, идущая на образование тормозного излучения.

Экспозиционная доза не является основной величиной в области радиотерапии с использованием ускорителей, но значение этой величины, полученное методом расчета из поглощенной дозы, удобно сопоставить со значением, полученным другим методом. Чехословацкими метрологами^{/2/} было получено, путем сравнения с эталоном, значение мощности экспозиционной дозы на установке РОКУС, которое после приведения на 31 декабря 1987 г. и к полю 20x20 см, составляет $527,4 \pm \pm 6,9$ мкА/кг. Отличие от значения, приведенного в табл. 3, составляет 0,3%, что полностью укладывается в ошибки измерений.

Численные значения коэффициентов, требуемых для расчета дозиметрических параметров исследуемого поля по формулам (5) ÷ (9), представлены в конце табл. 2.

Погрешности составляющих параметров, приведенные в табл. 1 и 2, являются стандартными отклонениями для случайных величин и максимальными — для систематических ошибок. Результирующие погрешности дозиметрических параметров, представленные в табл. 3, рассчитаны по методу, рекомендованному Международным агентством по атомной энергии^{/3/} как суммарные ошибки на доверительном уровне 95%.

Следует отметить высокую точность определения основных дозиметрических величин, вполне удовлетворяющую требованиям проведения в исследованном поле установки РОКУС градуировки детекторов, предназначенных как для оперативных измерений дозы в медицинских пучках, так и для исследовательских целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ICRU. Report 30, 1979.
2. Вагнер Р. и др. ОИЯИ, 16-87-935, Дубна, 1987.
3. IAEA Technical Report Series 185, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 января 1988 года.

Зельчинский М. 16-88-71
Определение абсолютного значения поглощенной дозы в тканезквивалентном материале в поле стандартного источника гамма-излучения

С целью создания эталонного поля облучения для градуировки медицинских дозиметров проведены абсолютные измерения основных дозиметрических параметров в поле изотопного источника ^{60}Co установки РОКУС. Измерения проводились с помощью тканезквивалентной ионизационной камеры с хорошо геометрически определенным объемом. Дозиметрические параметры определялись на основании теории полости, с применением ряда поправочных коэффициентов. Получено значение мощности поглощенной дозы в тканезквивалентном материале на расстоянии 75 см от центра источника, равное на 31 декабря 1987 г ($1,20 \pm 0,01$) Гр/мин.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод автора

Zielczyński M. 16-88-71
Determination of the Absolute Value of Absorbed Dose in Tissue-Equivalent Material in Standard Source of Gamma-Radiation Field

The absolute measurements of main dosimetric parameters in the ^{60}Co field of ROKUS irradiator type are performed in order to create a standard irradiation field for calibration of medical dosimeters. The measurements were made by means of tissue-equivalent ionization chamber with the volume well defined geometrically. Dosimetric parameters were determined basing on the cavity theory with the use of a number of correction factors. The value of the dose rate absorbed in a tissue-equivalent material at 75 cm distance from the source center has been obtained to equal (1.2 ± 0.01) Gy/min by Dec. 31, 1987.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear problems, JINR.
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988