

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

СОГЛАСОВАНО

Начальник отдела
науки и внедрения

И.И. Доста



16 февраля 1999 г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
министра здравоохранения

В.М. Ореховский



18 февраля 1999 г.

Регистрационный № 11-9901

**БЕЛОРУССКИЙ ПРОТОКОЛ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ
В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ПУЧКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Минск 1999

Учреждение-разработчик: НИИ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова

Авторы: д-р техн. наук, проф. И.Г. Тарутин, Ю.В. Нетецкий

Рецензент: канд. мед. наук Г.В. Чиж

Методические указания посвящены вопросу прецизионных измерений поглощенной дозы, создаваемой пучками электронов от медицинских ускорителей электронов, применяемых в лучевой терапии злокачественных опухолей. Указания полностью соответствуют требованиям международных рекомендаций и правил и адаптированы к условиям клинической практики лечебных учреждений Республики Беларусь.

Методические указания предназначены для применения в радиологических отделениях и отделениях дистанционной лучевой терапии, укомплектованных медицинскими ускорителями электронов.

Методические рекомендации утверждены Министерством здравоохранения Республики Беларусь в качестве официального документа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящий протокол базируется на протоколе «Свод правил по дозиметрии электронных пучков высоких энергий» Комиссии по радиационной дозиметрии Нидерландов [8], международных сводах правил «Определение поглощенной дозы в пучках фотонов и электронов» (отчет № 277 МАГАТЭ [2]) и «Использование плоскопараллельных ионизационных камер в электронных и фотонных пучках высоких энергий» (отчет № 381 МАГАТЭ [18]) и полностью удовлетворяет современным международным требованиям к такого рода документам.

Протокол подготовлен в лаборатории медицинских источников ионизирующих излучений и математического обеспечения лучевой терапии НИИ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова и предназначен для использования в радиологических отделениях онкологических клиник Республики Беларусь для дозиметрии электронных пучков с энергией выше 1 МэВ.

2. СВОД ПРАВИЛ

2.1. Определения

2.1.1. Параметры глубинного распределения дозы и ионизации (рис. 1)

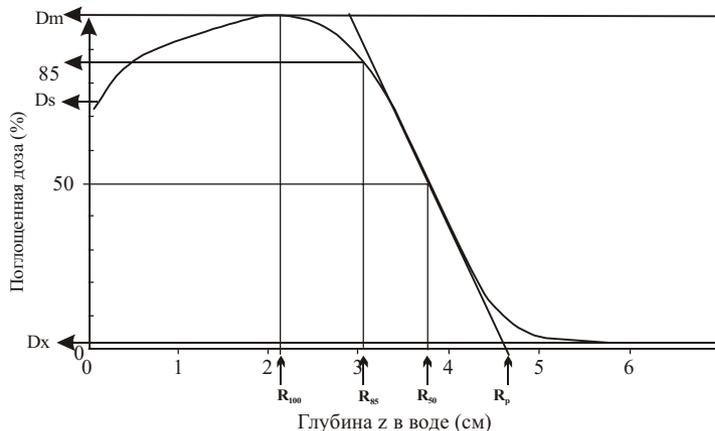


Рис. 1. Параметры распределения поглощенной дозы в воде вдоль центральной оси пучка электронов [8]

$R_{100, dos}$ — глубина залегания максимума поглощенной дозы в воде на оси пучка электронов;

$R_{50, dos}$ — глубина в воде на оси падающего пучка излучения, на которой поглощенная доза составляет 50% от дозы в максимуме;

$R_{100, ion}$ — глубина залегания максимума ионизации, создаваемой электронами в воде на оси падающего пучка излучения;

$R_{50, ion}$ — глубина в воде на оси падающего пучка излучения, на которой ионизация составляет 50% от максимальной.

2.2. Ионизационные камеры, применяемые для измерений

Поглощенная доза, создаваемая электронами в воде в стандартной точке, должна при аттестации измеряться стандартными ионизационными камерами, в качестве которых применяются:

- плоскопараллельная камера Маркуса РТW 23343,
- цилиндрическая наперстковая камера Фармера с графитовыми стенками РТW 30002.

Плоскопараллельную ионизационную камеру рекомендуется применять при низких значениях энергии электронов, чтобы минимизировать ошибки, связанные с позиционированием камеры и неточностями при определении некоторых коэффициентов коррекции для этих камер. Рабочие измерения поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы допускается проводить с цилиндрической наперстковой ионизационной камерой Фармера со стенками из полиметилметакрилата (ПММА) РТW 30001.

Размеры и характеристики рекомендуемых камер приведены в табл. 1.

2.3. Калибровка камер, применяемых для измерений

Стандартная камера должна быть откалибрована в воздухе в единицах воздушной кермы в Национальном центре стандартизации или в ведомственной поверочной дозиметрической лаборатории Минздрава Республики Беларусь на пучке фотонов ^{60}Co . Цилиндрическая камера должна иметь накопительный колпачок, входящий в комплект камеры (табл. 1). Плоскопараллельная камера Маркуса калибруется с дополнительным слоем графита толщиной $0,54 \text{ г/см}^2$ (3 мм), расположенным на входном окне камеры.

2.4. Определение эффективного центра камеры при проведении измерений

Для всех измерений, проводимых с помощью ионизационных камер в пучках электронов, следует использовать эффективный центр камеры, который должен располагаться на заданной глубине в водном фантоме. Для цилиндрической камеры эффективный центр расположен на расстоянии $0,5$ внутреннего радиуса камеры по направлению к источнику электронов от ее геометрического центра. Для плоскопараллельной камеры Маркуса эффективный центр расположен на внутренней поверхности входного окна.

2.5. Определение средней энергии электронов на поверхности фантома

Средняя энергия электронов на поверхности фантома (E_0) в МэВ определяется следующими выражениями:

$$E_0 = C_1 \cdot R_{50, \text{dos}} \quad (1)$$

или

$$E_0 = C_2 \cdot R_{50, \text{ion}} \quad (2)$$

где $R_{50, \text{dos}}$ и $R_{50, \text{ion}}$ должны быть в сантиметрах. Значения C_1 и C_2 (МэВ/см) приводятся на рис. 2 в зависимости от R_{50} . Коэффициенты действительны для расстояния источник-поверхность (РИП) около 100 см.

Таблица 1

**Характеристики стандартных ионизационных камер
и накопительных колпачков для измерений
в пучках электронов**

Камера	PTW 30001	PTW 30002	PTW 23343
Тип камеры	цилиндрическая Фармера		плоскопараллельная Маркуса
Размеры полости длина, мм диаметр, мм	0,5 r = 1,5 мм 23 6,1		2 5,3
Стенки камеры материал толщина, мм	ПММА 0,45 (0,083 г/см ²)	графит 0,45 (0,083 г/см ²)	полиэтилен 0,03 (2,3 мг/см ²)
Электрод материал диаметр, мм	алюминий 1,0	графит 1,0	ПММА, покрыт графитом 5,3
Накопительный колпачок материал толщина, мм	ПММА 4,7 (0,557 г/см ²)	ПММА 4,7 (0,557 г/см ²)	графитовая пластина 0,54 г/см ²
Охранное кольцо ширина, мм			0,7
$k_{att} k_m$	0,975	0,979	0,982
k_{cel}	1,006	1,000	1,000

2.6. Стандартные условия и стандартная точка

При проведении измерений поглощенная доза должна быть определена в стандартной точке при соблюдении стандартных условий.

Стандартные условия:

Поверхность водного фантома располагается на стандартном расстоянии от источника электронов. Размеры поля облучения должны быть 10 × 10 см на поверхности фантома.

Стандартная точка:

Стандартная точка располагается на глубине максимума дозы ($R_{100, dos}$) на кривой глубинного распределения дозы, измеренной по оси поля облучения. Величина $R_{100, dos}$ может быть определена двумя способами:

- из прямых измерений глубинного распределения дозы, осуществляемых с помощью твердотельных детекторов, например алмазных;
- перерасчетом кривой глубинного распределения ионизации, определенного в стандартных условиях, в кривую глубинного распределения дозы. Измерения ионизации проводятся в воде одной из стандартных

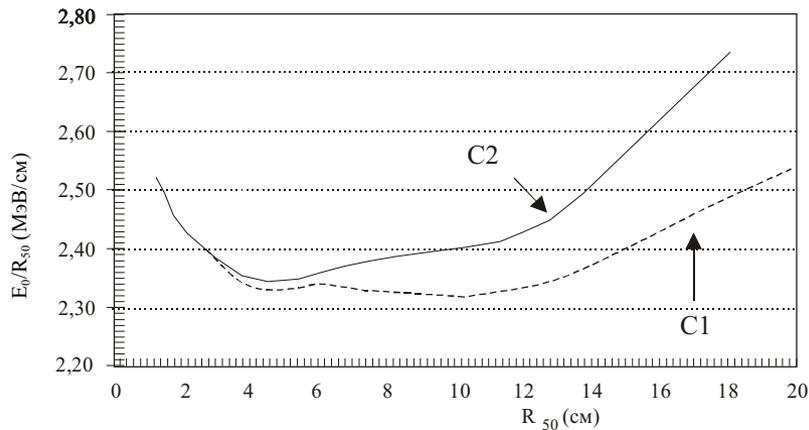


Рис. 2. Коэффициенты E_0/R_{50} в зависимости от глубины R_{50} в воде [8]

ионизационных камер. Перерасчет осуществляется путем умножения значений ионизации на отношения тормозных способностей электронов в воде и воздухе, приведенные в табл. 2. Эти отношения приводятся в зависимости от средней энергии электронов на поверхности фантома (E_0) и глубины (z).

2.7. Тканеэквивалентные среды и соотношения между их характеристиками

Поглощенная доза должна измеряться в воде. Кроме воды допускается применение в качестве фантомного материала полиметилме-такрилата (ПММА, плексиглас). Если глубина стандартной точки в воде будет пересчитана в соответствующее значение в ПММА при одинаковом РИП, поглощенная доза в ПММА будет равна таковой в воде. Соответствующая глубина в твердом фантоме, изготовленном из ПММА, определяется исходя из соотношения

$$Z_{pmmma, ref} = Z_{w, ref} / K_{pmmma}, \quad (3)$$

где $Z_{w, ref}$ — глубина залегания стандартной точки в воде (см),

$Z_{pmmma, ref}$ — соответствующая глубина в твердом фантоме,

K_{pmmma} — коэффициент пересчета глубины.

Коэффициент K_{pmmma} зависит от плотностей материала ПММА и воды:

$$K_{pmmma} = \frac{\rho_{pmmma}}{\rho_w} \cdot K_{csda}, \quad (4)$$

где ρ_{pmmma} , ρ_w — плотность в г/см³ ПММА и воды, K_{csda} — отношение длины пробега электронов в воде и в ПММА в приближении постоянного замедления (то есть принимая замедление электронов постоянным).

Рекомендуемое значение коэффициента $K_{csda} = 0,962$. При плотности $\rho_{pmmma} = 1,185$ г/см³ получается значение $K_{pmmma} = 1,140$. Для точных измерений плотность РММА должна быть определена.

Таблица 2

**Отношение массовых тормозных способностей для воды и воздуха
для моноэнергетических электронов в зависимости от средней энергии
на поверхности фантома (МэВ) и глубины (мм) [4]**

Глубина, мм	Средняя энергия на поверхности фантома (МэВ)																		
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	18	20	22	25	30	40	50	
0	1,066	1,049	1,034	1,026	1,014	1,006	0,998	0,993	0,981	0,969	0,961	0,955	0,948	0,943	0,936	0,924	0,912	0,907	
1	1,072	1,055	1,040	1,030	1,018	1,010	1,002	0,996	0,985	0,973	0,965	0,959	0,951	0,946	0,938	0,927	0,914	0,908	
2	1,079	1,060	1,045	1,033	1,022	1,014	1,005	0,999	0,988	0,976	0,968	0,962	0,954	0,948	0,941	0,929	0,915	0,909	
3	1,085	1,065	1,049	1,037	1,026	1,018	1,009	1,002	0,990	0,979	0,971	0,964	0,957	0,951	0,943	0,932	0,917	0,911	
4	1,091	1,070	1,053	1,041	1,029	1,021	1,011	1,005	0,993	0,982	0,973	0,966	0,959	0,953	0,945	0,340	0,918	0,912	
5	1,097	1,075	1,057	1,044	1,032	1,023	1,014	1,007	0,995	0,984	0,975	0,968	0,961	0,955	0,946	0,935	0,920	0,913	
6	1,102	1,079	1,061	1,048	1,035	1,026	1,016	1,009	0,997	0,986	0,977	0,970	0,963	0,957	0,948	0,937	0,921	0,914	
8	1,112	1,089	1,069	1,055	1,041	1,031	1,021	1,013	1,001	0,989	0,980	0,973	0,966	0,960	0,951	0,940	0,924	0,916	
10	1,120	1,098	1,077	1,062	1,047	1,036	1,025	1,018	1,004	0,992	0,983	0,975	0,969	0,962	0,953	0,943	0,926	0,918	
12	1,127	1,107	1,086	1,070	1,054	1,042	1,030	1,022	1,008	0,995	0,985	0,978	0,971	0,964	0,956	0,945	0,928	0,920	
14	1,132	1,116	1,095	1,079	1,061	1,048	1,035	1,027	1,011	0,998	0,988	0,981	0,973	0,966	0,958	0,947	0,930	0,922	
16	1,135	1,123	1,104	1,087	1,069	1,054	1,041	1,031	1,015	1,001	0,991	0,983	0,975	0,969	0,960	0,948	0,932	0,923	
18	1,137	1,129	1,112	1,095	1,076	1,061	1,047	1,037	1,018	1,004	0,994	0,986	0,977	0,971	0,962	0,950	0,933	0,924	
20		1,133	1,118	1,103	1,084	1,068	1,053	1,042	1,023	1,008	0,997	0,988	0,980	0,973	0,964	0,952	0,935	0,925	
25			1,128	1,120	1,102	1,086	1,069	1,056	1,034	,016	1,004	0,994	0,986	0,978	0,969	0,956	0,938	0,928	
30			1,133	1,131	1,118	1,103	1,086	1,072	1,047	,027	1,012	1,002	0,992	0,984	0,974	0,960	0,941	0,931	
35				1,132	1,129	1,118	1,102	1,087	1,060	,038	1,021	,008	0,998	0,989	0,978	0,964	0,944	0,933	
40					1,128	1,116	1,103	1,087	1,074	,050	1,031	,016	1,005	0,996	0,984	0,969	0,948	0,935	
45						1,130	1,127	1,115	1,088	,062	1,041	,026	1,012	1,002	0,990	0,973	0,951	0,938	
50								1,125	1,102	,075	1,053	,035	1,021	1,009	0,995	0,978	0,955	0,940	
60								1,124	1,123		1,100	1,077	,056	1,038	1,024	1,007	0,987	0,962	0,946
80											1,118	1,118	,099	1,078	1,060	1,037	1,009	0,977	0,957
100														1,114	1,098	1,071	1,036	0,993	0,970
120															1,109	1,104	1,065	1,012	0,984
140																	1,095	1,034	0,999
160																	1,099	1,058	1,015
180																		1,081	1,033
200																		1,091	1,053
220																			1,071
240																			1,084

2.8. Определение поглощенной дозы в воде

Эффективный центр камеры при измерениях в воде должен размещаться в стандартной точке в фантоме (в максимуме дозы по центральной оси пучка электронов, п. 2.6). Поглощенная доза в воде определяется соотношением:

$$D_{w,e} = M \cdot N_k \cdot C_{w,e}, \quad (5)$$

где $D_{w,e}$ — поглощенная доза в воде, создаваемая пучком электронов, в стандартной точке при условии замещения воздушного объема камеры водой;

M — показания электрметра, откорректированные с учетом разницы значений температуры, давления и влажности при измерениях и калибровке камеры в органах стандартизации, а также эффектов поляризации и рекомбинации в пучке электронов;

N_k — калибровочный коэффициент перехода к керме в воздухе, определенный в поверочно-дозиметрической лаборатории МЗ РБ либо в Национальном центре по стандартизации, метрологии и сертификации, который используется для перехода от показаний ионизационной камеры к керме в воздухе для пучка со стандартным индексом качества и стандартной геометрии при стандартных окружающих условиях (обычно при температуре воздуха 20°C, атмосферном давлении 101,3 кПа и относительной влажности 50%);

$C_{w,e}$ — коэффициент перехода от воздушной кермы к поглощенной дозе в воде, который зависит от типа камеры, энергии электронов и глубины расположения камеры.

Рекомендуемые значения $C_{w,e}$ в зависимости от средней энергии электронов на поверхности фантома (E_0) и глубины в воде приведены в табл. 3.1, 3.2 и 3.3 для камер 30001, 30002 и 23343 соответственно.

2.9. Приборы для измерения характеристик полей облучения

Ионизационные камеры, применяемые в анализаторах характеристик полей облучения, должны быть откалиброваны по стандартным ионизационным камерам в пучке излучения того же качества, для измерения параметров которого они будут использоваться. Сначала поглощенная доза в воде должна быть определена с помощью стандартной камеры, как это изложено в разделе 2.8. Затем показания анализатора характеристик поля облучения должны быть получены с помощью камеры, размещенной в фантоме в стандартной точке (раздел 2.6). Калибровочный коэффициент для измерений в фантоме для ионизационной камеры анализатора $N_{ph,e}$ определяется выражением

$$N_{ph,e} = \frac{D_{w,e}}{M_f} = \frac{(M \cdot N_k \cdot C_{w,e})_{ref.chamber}}{M_f}, \quad (6)$$

где M_f — показания ионизационной камеры анализатора, откорректированные таким же образом, как и M .

Таблица 3.1

**Коэффициенты перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде $C_{w,e}$
для ионизационной камеры PTW 30001**

Глубина, (мм)	Средняя энергия на поверхности фантома (МэВ)																	
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	18	20	22	25	30	40	50
1	0,998	0,985	0,974	0,969	0,961	0,956	0,951	0,949	0,943	0,936	0,931	0,927	0,922	0,918	0,912	0,901	0,889	0,884
2	1,003	0,990	0,979	0,972	0,964	0,959	0,954	0,951	0,946	0,939	0,935	0,931	0,925	0,921	0,914	0,904	0,891	0,885
3	1,009	0,994	0,983	0,975	0,967	0,962	0,956	0,953	0,948	0,942	0,937	0,934	0,927	0,923	0,917	0,905	0,892	0,886
4		0,998	0,986	0,978	0,970	0,965	0,960	0,956	0,950	0,944	0,940	0,936	0,930	0,925	0,918	0,908	0,894	0,888
5		1,003	0,989	0,981	0,973	0,968	0,961	0,958	0,952	0,947	0,942	0,937	0,932	0,927	0,920	0,331	0,895	0,889
6		1,007	0,993	0,983	0,975	0,969	0,963	0,959	0,953	0,948	0,943	0,939	0,934	0,929	0,921	0,911	0,897	0,890
8		1,010	0,996	0,986	0,977	0,971	0,965	0,961	0,955	0,950	0,945	0,941	0,936	0,931	0,923	0,913	0,898	0,891
10		1,018	1,002	0,992	0,982	0,975	0,968	0,963	0,958	0,951	0,947	0,943	0,938	0,934	0,926	0,916	0,901	0,893
12		1,025	1,008	0,997	0,986	0,979	0,971	0,967	0,959	0,953	0,949	0,945	0,941	0,935	0,928	0,919	0,903	0,895
14			1,016	1,004	0,992	0,983	0,975	0,970	0,962	0,955	0,950	0,947	0,942	0,937	0,931	0,921	0,905	0,897
16				1,011	0,997	0,988	0,978	0,973	0,964	0,957	0,952	0,949	0,944	0,939	0,932	0,923	0,907	0,899
18				1,017	1,003	0,992	0,983	0,976	0,967	0,959	0,954	0,951	0,946	0,941	0,934	0,924	0,909	0,900
20				1,024	1,009	0,998	0,987	0,981	0,968	0,960	0,956	0,953	0,947	0,943	0,936	0,926	0,910	0,901
25					1,015	1,003	0,992	0,984	0,972	0,963	0,958	0,954	0,950	0,945	0,938	0,927	0,912	0,902
30						1,017	1,004	0,995	0,980	0,968	0,962	0,958	0,954	0,949	0,942	0,931	0,914	0,905
35							1,017	1,007	0,989	0,976	0,967	0,963	0,958	0,953	0,946	0,935	0,917	0,908
40								1,018	0,998	0,983	0,973	0,966	0,962	0,957	0,950	0,939	0,920	0,910
45									1,009	0,992	0,979	0,971	0,966	0,962	0,955	0,943	0,924	0,912
50									1,019	1,000	0,986	0,978	0,970	0,965	0,959	0,947	0,927	0,915
60										1,010	0,995	0,983	0,976	0,970	0,963	0,951	0,931	0,916
80											1,011	0,997	0,986	0,978	0,970	0,958	0,937	0,922
100													1,012	1,001	0,988	0,974	0,951	0,933
120															1,009	0,990	0,966	0,945
140																1,006	0,981	0,959
160																	0,994	0,972
180																	1,005	0,986
200																	1,015	0,998
220																		1,006
																		1,012

Таблица 3.2

Коэффициенты перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде $C_{w,e}$ с для ионизационной камеры PTW 30002

Глубина (мм)	Средняя энергия на поверхности фантома (МэВ)																	
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	18	20	22	25	30	40	50
0	1,002	0,989	0,978	0,973	0,965	0,960	0,955	0,953	0,946	0,940	0,935	0,931	0,926	0,922	0,915	0,904	0,893	0,888
1	1,007	0,994	0,983	0,976	0,968	0,963	0,958	0,955	0,950	0,943	0,939	0,935	0,928	0,924	0,917	0,907	0,895	0,889
2	1,013	0,998	0,987	0,979	0,971	0,966	0,960	0,957	0,952	0,946	0,941	0,938	0,931	0,926	0,920	0,909	0,896	0,890
3		1,003	0,990	0,982	0,974	0,969	0,964	0,960	0,954	0,948	0,944	0,939	0,934	0,929	0,922	0,912	0,898	0,892
4		1,007	0,994	0,985	0,977	0,972	0,965	0,962	0,956	0,951	0,946	0,941	0,936	0,931	0,924	0,333	0,899	0,893
5		1,011	0,997	0,987	0,979	0,973	0,967	0,963	0,957	0,952	0,947	0,943	0,938	0,933	0,925	0,915	0,901	0,894
6		1,014	1,000	0,991	0,981	0,975	0,969	0,965	0,959	0,953	0,949	0,945	0,940	0,935	0,927	0,917	0,902	0,895
8		1,022	1,006	0,996	0,986	0,979	0,972	0,967	0,961	0,955	0,951	0,947	0,942	0,938	0,930	0,920	0,905	0,897
10		1,029	1,013	1,001	0,990	0,983	0,975	0,971	0,963	0,957	0,953	0,949	0,945	0,939	0,932	0,923	0,906	0,899
12			1,020	1,008	0,996	0,987	0,979	0,974	0,966	0,959	0,954	0,951	0,946	0,941	0,934	0,925	0,908	0,901
14				1,015	1,001	0,992	0,982	0,977	0,968	0,961	0,956	0,953	0,948	0,943	0,936	0,927	0,910	0,903
16				1,021	1,007	0,996	0,987	0,980	0,970	0,963	0,958	0,955	0,949	0,945	0,938	0,927	0,912	0,904
18				1,028	1,013	1,002	0,991	0,985	0,972	0,964	0,960	0,957	0,951	0,947	0,940	0,929	0,913	0,905
20					1,019	1,007	0,996	0,988	0,976	0,967	0,962	0,958	0,953	0,949	0,942	0,931	0,915	0,906
25						1,021	1,008	0,999	0,984	0,972	0,966	0,962	0,958	0,953	0,946	0,935	0,918	0,908
30							1,021	1,011	0,993	0,980	0,971	0,967	0,962	0,957	0,950	0,939	0,921	0,911
35								1,022	1,002	0,987	0,977	0,970	0,966	0,961	0,954	0,942	0,924	0,913
40									1,013	0,996	0,984	0,975	0,970	0,966	0,958	0,947	0,928	0,915
45									1,023	1,004	0,990	0,982	0,974	0,969	0,963	0,950	0,931	0,918
50										1,014	0,999	0,987	0,980	0,974	0,967	0,955	0,935	0,920
60											1,016	1,002	0,990	0,982	0,974	0,962	0,941	0,926
80													1,017	1,005	0,992	0,978	0,955	0,937
100															1,013	0,994	0,970	0,949
120																1,010	0,985	0,963
140																	0,998	0,976
160																	1,009	0,990
180																	1,019	1,002
200																		1,010
220																		1,016

Таблица 3.3

**Коэффициенты перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде C_w, e
для ионизационной камеры РТW 23343**

Глубина (мм)	Средняя энергия на поверхности фантома (МэВ)																	
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	18	20	22	25	30	40	50
0	1,034	1,022	1,010	1,004	0,993	0,986	0,979	0,974	0,963	0,951	0,944	0,938	0,931	0,926	0,919	0,907	0,896	0,891
1	1,039	1,027	1,015	1,007	0,997	0,990	0,983	0,977	0,967	0,955	0,948	0,942	0,934	0,929	0,921	0,910	0,898	0,892
2	1,044	1,031	1,020	1,010	1,001	0,994	0,986	0,980	0,970	0,958	0,951	0,945	0,937	0,931	0,924	0,912	0,899	0,893
3		1,035	1,023	1,014	1,004	0,998	0,989	0,983	0,972	0,961	0,953	0,947	0,940	0,934	0,926	0,915	0,900	0,895
4		1,039	1,026	1,017	1,007	1,000	0,991	0,986	0,975	0,964	0,955	0,949	0,942	0,936	0,928	0,334	0,901	0,896
5		1,043	1,029	1,020	1,010	1,002	0,994	0,988	0,977	0,966	0,957	0,951	0,944	0,938	0,929	0,918	0,903	0,897
6		1,045	1,033	1,023	1,012	1,005	0,996	0,990	0,979	0,968	0,959	0,952	0,946	0,940	0,931	0,920	0,904	0,898
8			1,039	1,029	1,017	1,009	1,000	0,993	0,982	0,971	0,962	0,955	0,949	0,943	0,934	0,923	0,907	0,900
10			1,045	1,034	1,022	1,014	1,004	0,998	0,985	0,974	0,965	0,957	0,952	0,945	0,936	0,926	0,909	0,901
12			1,051	1,041	1,028	1,019	1,009	1,002	0,989	0,977	0,967	0,960	0,953	0,947	0,939	0,928	0,911	0,903
14				1,047	1,034	1,024	1,013	1,006	0,992	0,980	0,970	0,963	0,955	0,949	0,941	0,930	0,913	0,905
16				1,053	1,040	1,029	1,018	1,010	0,996	0,982	0,973	0,965	0,957	0,952	0,943	0,931	0,915	0,906
18					1,046	1,035	1,023	1,015	0,998	0,985	0,976	0,968	0,959	0,953	0,945	0,933	0,916	0,907
20					1,051	1,040	1,028	1,019	1,003	0,989	0,979	0,970	0,962	0,955	0,947	0,93	0,918	0,908
25						1,053	1,041	1,031	1,613	0,997	0,985	0,976	0,968	0,960	0,952	0,939	0,921	0,911
30							1,053	1,044	1,024	1,007	0,993	0,984	0,974	0,966	0,956	0,943	0,924	0,914
35								1,054	1,035	1,017	1,001	0,989	0,980	0,971	0,960	0,947	0,927	0,916
40									1,046	1,027	1,011	0,997	0,987	0,978	0,966	0,952	0,931	0,918
45									1,055	1,037	1,020	1,006	0,993	0,984	0,972	0,955	0,934	0,921
50										1,047	1,030	1,015	1,002	0,991	0,977	0,960	0,938	0,923
60											1,049	1,033	1,018	1,005	0,989	0,969	0,945	0,929
80													1,050	1,037	1,017	0,991	0,959	0,940
100															1,046	1,017	0,975	0,953
120																1,042	0,994	0,966
140																	1,015	0,981
160																	1,037	0,997
180																	1,053	1,014
200																		1,033
220																		1,048

2.10. Измерения глубинных осевых распределений дозы

Глубинные осевые распределения дозы для условий, отличных от стандартных, могут определяться:

а) по измерениям в воде с помощью твердотельных детекторов, например алмазных;

б) перерасчетом глубинных осевых распределений ионизации в распределения дозы. Этот перерасчет осуществляется путем умножения значений ионизации на отношения тормозных способностей электронов в воде и воздухе, взятые из табл. 2. Значения тормозных способностей приведены в зависимости от средней энергии электронов на поверхности фантома и глубины в воде. Определение ионизационных кривых для нестандартных условий может проводиться как стандартными камерами, так и цилиндрическими ионизационными камерами с внутренним радиусом менее 3 мм (например, PTW 31002, табл. 3.4);

в) по измерениям, проводимым с помощью пленок, ТЛД или других детекторов, обычно применяемых в учреждении, однако использование этих методик должно быть верифицировано с помощью методик, изложенных в пунктах а) или б).

3. КОММЕНТАРИИ

3.1. Стандартные камеры

В Белорусском протоколе для дозиметрии фотонных пучков высоких энергий [1] в качестве стандартной ионизационной камеры рекомендована камера Фармера с графитовыми стенками (PTW 30002). Графит является чистым материалом, для которого хорошо известны дозиметрические параметры, например k_m (см. п. 4). Ионизационная камера со стенками из ПММА не рекомендуется в качестве стандартной из-за недостаточной точности в определении коэффициента k_m , связанной с неодинаковой толщиной графитового покрытия. Эта камера (PTW 30001) тем не менее разрешена к использованию в рабочих измерениях, не связанных с аттестацией.

Аналогичный подход применен к методике измерения доз, создаваемых в воде пучками электронов. Та же камера рекомендуется в качестве стандартной. Кроме того, в качестве стандартной для дозиметрии пучков электронов малой энергии рекомендуется камера Маркуса. Исследования этой камеры проведены голландскими специалистами, которые показали, что только камеры, выпускаемые фирмой «PTW-Freiburg», имеют воспроизводимые характеристики и малые дополнительные погрешности [8]. Только для этих камер может быть достаточно точно определен коэффициент $C_{w,e}$.

3.1.1. Выбор камеры для измерений

Этот выбор зависит от двух факторов, связанных с применением цилиндрической ионизационной камеры. Во-первых, для малых энергий возможная неточность позиционирования эффективного центра камеры по отношению к форме кривой глубинного осевого распределения дозы возрастает. Во-вторых, неопределенность необходимой коррекции на возмущение потока электронов возрастает при малых энергиях. Исходя из этого, можно сформулировать два критерия:

а) *Критерий позиции*

Плоскопараллельная ионизационная камера Маркуса с ее хорошо определенной эффективной точкой измерения может быть размещена в среде точно. Для стандартной цилиндрической камеры экспериментально

определено, что положение эффективной точки измерения на глубине максимума дозы сдвинуто в направлении источника излучения от геометрического центра камеры [10]. Этот сдвиг зависит от энергии электронов и меняется от 0,3 до 0,7 от внутреннего радиуса полости камеры. В настоящем протоколе, как и в [2, 8, 18], рекомендуется значение 0,5 г. Таким образом, если смещение по глубине на 0,5 мм от максимума дозы приводит к существенному уменьшению ионизации, необходимо использовать для измерений плоскопараллельную камеру Маркуса.

б) Критерий энергии

В исследованиях К.А. Johansson et al. [11] показано, что совпадение значений поглощенной дозы, измеренных плоскопараллельной камерой Маркуса и 0,6 см³ камерами Фармера достигается вплоть до значения средней энергии электронов 3–4 МэВ. Поэтому использовать цилиндрическую камеру для средних энергий электронов на глубине измерения меньше 4 МэВ не рекомендуется. Количественно средняя энергия электронов на глубине z может быть определена из следующего выражения:

$$E_z = E_0 - a \cdot z, \quad (7)$$

где E_z — средняя энергия электронов на глубине z см в фантоме, МэВ;

E_0 — средняя энергия электронов на поверхности фантома, МэВ;

$a = 2$ МэВ/см.

Характеристики камеры Маркуса плохо известны для средних энергий меньше 2,5 МэВ, поэтому для измерений глубинных распределений электронов очень малых энергий ее применять нельзя.

Коэффициент перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде $C_{w,e}$ для камеры Маркуса определяется исходя из ее калибровки на пучке фотонов ⁶⁰Со с дополнительным слоем 0,54 г/см² (3 мм) графита для достижения электронного равновесия.

3.2. Фантомные материалы

Поглощенная доза должна определяться в воде. Однако твердые фантомные материалы, такие, как ПММА или полистирол, иногда более удобны для измерений, чем вода, особенно если измерения проводятся на первых нескольких миллиметрах среды или если это рутинные измерения. Для того чтобы преобразовать ионизацию, измеренную на глубине ионизационного максимума в твердом фантоме, к ионизации в воде, измеренные данные должны быть откорректированы. Добавим, что шкалы глубин в твердом фантоме и воде должны быть сопоставимы. От этого существенно зависит результат измерения.

3.2.1. Коррекция ионизации

На самом деле нет существенной разницы между глубиной расположения ионизационного максимума в воде и в ПММА, так как значения линейной рассеивающей способности близки в ПММА и воде [15]. Ионизационные измерения в полистироле нуждаются в коррекции. Сообщалось о коррекции до 3%, зависящей от энергии и типа пучка электронов [7], хотя в некоторых публикациях расхождение не превышает 1% [14]. Поэтому настоящий протокол рекомендует применять ПММА в качестве материала твердого фантома.

Таблица 3.4

**Коэффициенты перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде $C_{w, e}$
для ионизационной камеры PTW 31002**

Глубин» (мм)	Средняя энергия на поверхности фантома (МэВ)																	
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	18	20	22	25	30	40	50
0	0,999	0,986	0,975	0,970	0,962	0,957	0,952	0,950	0,944	0,937	0,932	0,928	0,923	0,919	0,913	0,902	0,890	0,885
1	1,004	0,991	0,980	0,473	0,965	0,960	0,955	0,952	0,947	0,940	0,936	0,932	0,926	0,922	0,915	0,904	0,892	0,886
2	1,010	0,995	0,984	0,976	0,968	0,963	0,957	0,954	0,949	0,943	0,938	0,935	0,928	0,923	0,917	0,906	0,893	0,887
3		0,999	0,987	0,979	0,971	0,966	0,961	0,957	0,951	0,945	0,941	0,936	0,931	0,926	0,919	0,909	0,895	0,889
4		1,004	0,990	0,982	0,974	0,969	0,962	0,959	0,953	0,948	0,943	0,938	0,933	0,928	0,921	0,912	0,896	0,890
S		1,008	0,994	0,984	0,976	0,970	0,964	0,960	0,954	0,949	0,944	0,940	0,935	0,930	0,922	0,912	0,898	0,891
6		1,011	0,997	0,987	0,978	0,972	0,966	0,962	0,956	0,951	0,946	0,942	0,937	0,932	0,924	0,914	0,899	0,892
8		1,019	1,001	0,993	0,983	0,976	0,969	0,964	0,959	0,952	0,948	0,944	0,939	0,935	0,927	0,917	0,902	0,894
10		1,026	1,010	0,998	0,987	0,980	0,972	0,968	0,960	0,954	0,950	0,946	0,942	0,936	0,929	0,920	0,904	0,896
12			1,017	1,005	0,993	0,984	0,976	0,971	0,963	0,956	0,951	0,948	0,943	0,938	0,932	0,922	0,906	0,898
14				1,012	0,998	0,989	0,979	0,974	0,965	0,958	0,953	0,950	0,945	0,940	0,933	0,924	0,908	0,900
16				1,018	1,004	0,993	0,984	0,977	0,967	0,960	0,955	0,952	0,947	0,942	0,935	0,925	0,910	0,901
18				1,025	1,010	0,999	0,988	0,982	0,969	0,961	0,957	0,954	0,948	0,944	0,937	0,927	0,911	0,902
20					1,016	1,004	0,993	0,985	0,973	0,964	0,959	0,955	0,950	0,946	0,939	0,928	0,912	0,903
25						1,018	1,008	0,996	0,981	0,969	0,963	0,959	0,955	0,950	0,943	0,932	0,915	0,906
30							1,018	1,008	0,990	0,977	0,968	0,964	0,959	0,954	0,947	0,936	0,918	0,909
35								1,019	0,999	0,984	0,974	0,967	0,963	0,958	0,951	0,940	0,921	0,911
40									1,010	0,993	0,980	0,972	0,967	0,963	0,956	0,944	0,925	0,913
45									1,020	1,001	0,987	0,979	0,971	0,966	0,960	0,948	0,928	0,915
«										1,011	0,996	0,984	0,977	0,971	0,964	0,952	0,932	0,917
W											1,012	0,998	0,987	0,979	0,971	0,959	0,938	0,923
80													1,013	1,002	0,989	0,975	0,952	0,934
100															1,010	0,991	0,967	0,946
120																1,007	0,982	0,960
140																	0,995	0,973
160																	1,006	0,987
180																	1,016	0,999
200																		1,007
220																		1,013

3.2.2. Коррекция шкал

Для определения поглощенной дозы в воде при измерениях, проведенных в фантоме из ПММА, глубина залегания максимума дозы в воде должна быть пересчитана из соответствующей глубины в ПММА с учетом коэффициента K_{pmma} в соответствии с уравнением (3). Согласно работе В. Marcus [13], этот коэффициент может быть вычислен из уравнения

$$K_{pmma} = \frac{(Z/A)_{eff, pmma} \cdot \rho_{pmma}}{(Z/A)_{eff, w} \cdot \rho_w}, \quad (8)$$

где K_{pmma} — коэффициент пересчета глубины, как было определено в уравнении (3),

Z — атомный номер,

A — массовое число,

ρ_w, ρ_{pmma} — плотности (г/см) воды и ПММА соответственно.

Уравнение (8) приводит к хорошему согласию а определении поглощенной дозы в воде и ПММА. Для электронов с энергией от 4 до 20 МэВ на поверхности фантома разница в залегании 50% дозы на оси пучка и величине практического пробега в воде и ПММА составляет менее 1 и 2 мм соответственно [14].

Коэффициент пересчета глубины, примененный в настоящем протоколе, основан на линейном уменьшении пробега (r_0/ρ), согласно которому определенная процентная ионизация в двух веществах пропорциональна уменьшению пробега электронов в них. В уравнении

$$K_{pmma} = \frac{(r_0/\rho)_w}{(r_0/\rho)_{pmma}}, \quad (9)$$

$(r_0/\rho)_w$ и $(r_0/\rho)_{pmma}$ — линейное уменьшение пробега в воде и ПММА соответственно. При использовании этого коэффициента пересчета согласие между значениями процентных глубинных ионизации в воде и ПММА даже лучше, чем при использовании величины K_{pmma} , вычисленной из уравнения (8) [14]. В клинической практике обсуждавшиеся методы учета коэффициента K_{pmma} могут также применяться на глубине за максимумом дозы.

3.2.3. Накопление заряда

Дозиметрические ошибки могут возникать вследствие накопления заряда в материалах-изоляторах пластиковых фантомов, таких как ПММА и полистирол, облучаемых пучками электронов [9, 16]. Увеличение ионизационного тока камеры становится заметным после поглощенной дозы около 20 Гр при энергии электронов 6 МэВ. В этих экспериментах использовались блоки ПММА и полистирола толщиной 5 см. Однако в работе [19] указано, что не обнаруживается влияния накопления заряда на сигнал ионизационной камеры, если фантом состоит из отдельных пластин толщиной не более 2 см. Этот факт должен учитываться при измерениях в пластиковых фантомах. Однако, несмотря на это, необходимо проводить сличение показаний камер в пластиковом и водном фантомах.

3.3. Расстояние источник–поверхность

Численные значения C_1 и C_2 в уравнениях (1) и (2) были определены с помощью измерений при РИП, равном 100 см [6], определенном по той же технологии, что и в случае применения пучков фотонов. В Нидерландском протоколе [8] указывается, что разница между R_{50} , определенного для РИП = 100 см, и R_{50} для РИП, отличающегося от 100 см, мала для электронов с энергией ниже 30 МэВ и не оказывает влияния на величину тормозной способности в максимуме дозы.

3.4. Центральные глубинные осевые распределения ионизации и дозы

Кривые глубинного распределения поглощенной дозы могут измеряться, кроме ионизационных камер, диодами, фотопленками и ТЛД. В работе [17] показано, что тщательно разработанные и соблюдаемые методики применения различных детекторов дают результаты, совпадающие до 1 мм. Измерения с помощью кремниевых р-детекторов кажутся наиболее приемлемыми, так как такие детекторы имеют точечные размеры и дают данные для прямого определения глубинной дозы, которые практически не требуют коррекции.

Осевая кривая глубинного распределения ионизации должна быть пересчитана в осевую кривую глубинного распределения дозы, как было отмечено в разделе 2.10. Необходимо откорректировать показания дозиметра в связи с зависимостью некоторых факторов от глубины, например, рекомбинации, а для цилиндрических камер — также от фактора преобразования потока и положения эффективного центра при измерениях. Эта коррекция не вводится в коэффициент $C_{w,e}$.

Коэффициент, учитывающий рекомбинацию и ее уменьшение с глубиной, более значим для цилиндрических камер, чем для плоскопараллельных.

3.5. Зависимость поглощенной дозы от размера поля

Глубина максимума дозы в общем зависит от размера поля. Используя диоды р-типа, можно прямо определить положение максимума дозы в полях, отличных от стандартных, и найти их отношение. Применяя одну из стандартных ионизационных камер, следует определить положение максимума дозы для остальных полей, как это указано в разделе 2.6. Уравнение (5) должно быть использовано для определения значения дозы в максимуме. Для малых размеров поля, особенно меньших, чем 6×6 см, рекомендуется использовать р-диоды для измерения осевых кривых глубинного распределения дозы. Это означает, что $R_{50,dos}$ и $R_{50,ion}$ должны определяться для полей облучения по крайней мере 10×10 см и РИП = 100 см.

4. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ

Формализм для определения поглощенной дозы в воде основан на калибровке ионизационных камер в единицах воздушной кермы на пучке фотонов ^{60}Co и в общем виде выражается уравнением

$$D_{w,e} = M \cdot N_k \cdot (1-g) \cdot Pk_i \cdot S_{w,air} \cdot Pr_i \quad (10)$$

где $D_{w,e}$ — поглощенная доза в воде, создаваемая электронами;

M — откорректированное показание электрометра:

$$M = M_{uncorr} \cdot p_t \cdot p_p \cdot p_{hum} \cdot p_{ion} \cdot p_{pol} \quad (11)$$

M_{uncorr} — прямое показание электрометра, p_t , p_p , p_{hum} — коэффициенты коррекции на отклонение от стандартных условий температуры, давления и влажности соответственно, p_{ion} — коэффициент коррекции, учитывающий рекомбинацию ионов, p_{pol} — коэффициент коррекции для учета поляризационных эффектов в пучке электронов;

N_k — калибровочный коэффициент перехода к керме в воздухе, определенный на пучке фотонов ^{60}Co ;

g — часть энергии вторичных заряженных частиц, которая преобразуется в тормозное излучение в воздухе при калибровке на пучке фотонов ^{60}Co ;

Pk_i — произведение коэффициентов коррекции, применяемое при пересчете кермы в воздухе, полученной при калибровке в фотонном пучке, в поглощенную дозу в полости ионизационной камеры:

$$Pk_i = k_{att} \cdot k_m \cdot k_{cel} \cdot k_{stem} \quad (12)$$

k_{att} — коэффициент коррекции, учитывающий поглощение и рассеяние в стенке, накопительном колпачке и центральном электроде ионизационной камеры в калибровочном пучке фотонов;

k_m — коэффициент коррекции, учитывающий разницу в составе стенки камеры и накопительного колпачка и воздуха:

$$k_m = [\alpha \cdot S_{wall, air} \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air, wall} + (1 - \alpha) \cdot S_{cap, air} \cdot (\mu_{en}/\rho)_{air, cap}]^{-1} \quad (13)$$

α — часть ионизации внутри воздушной полости, обусловленная электронами, происходящими из стенок камеры; $S_{wall, air}$, $S_{cap, air}$ — отношение массовых тормозных способностей для материала стенок и воздуха и накопительного колпачка и воздуха соответственно;

$(\mu_{en}/\rho)_{air, wall}$, $(\mu_{en}/\rho)_{air, cap}$ — отношение массовых коэффициентов поглощения энергии для воздуха и материала стенок и воздуха и колпачка соответственно;

k_{cel} — коэффициент коррекции, учитывающий разницу в составе центрального электрода и воздуха;

k_{stem} — коэффициент коррекции, учитывающий влияние ножки камеры на величину ионизации в поле облучения;

$S_{w, air}$ — отношение массовых тормозных способностей для воды и воздуха;

Pr_i — произведение коэффициентов коррекции, вводимых при измерениях в водном фантоме при данном качестве излучения:

$$Pr_i = p_{wall} \cdot p_d \cdot p_f \cdot p_{cel} \quad (14)$$

p_{wall} — коэффициент коррекции, учитывающий разницу в элементном составе стенки камеры и воды; p_d — коэффициент коррекции, учитывающий разницу в ионизации в эффективной точке измерения и на той глубине, для которой производится измерение поглощенной дозы; p_f — коэффициент коррекции, учитывающий изменение потока электронов вследствие присутствия в водном фантоме воздушной полости; p_{cel} — коэффициент коррекции, учитывающий разницу в элементном составе центрального электрода и воды.

5. ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

5.1. Коррекция показаний электрометра

5.1.1. Коррекция на отклонение температуры и атмосферного давления от стандартных условий

$$P_{tp} = P_t P_p = \frac{p_0(273,2 + t)}{p(273,2 + t_0)}, \quad (15)$$

где p и t — давление и температура во время измерения, p_0 и t_0 — указанные в калибровочном сертификате стандартные величины давления и температуры (обычно 101,3 кПа и 20°C).

5.1.2. Коррекция на отклонение влажности воздуха от стандартных условий

Изменение влажности окружающего воздуха для большинства ионизационных камер оказывает очень незначительное влияние на показания дозиметра. Поэтому, если калибровочный коэффициент измерялся при относительной влажности 50%, то при относительной влажности во время измерений в диапазоне от 20% до 70% и температуре воздуха от 15°C до 25°C нет необходимости вводить коррекцию на отклонение влажности воздуха от стандартных условий.

5.1.3. Коррекция на рекомбинацию ионов

Используется так называемый метод «двух напряжений». Он основан на регистрации двух показаний дозиметра M_1 и M_2 , полученных при двух различных значениях рабочего напряжения на камере V_1 и V_2 причем отношение V_1/V_2 должно быть не менее 3. Коэффициент коррекции на рекомбинацию ионов p_{ion} для нормального рабочего напряжения V_1 можно получить из уравнения

$$p_{\text{ion}} = a_0 + a_1(M_1/M_2) + a_2(M_1/M_2)^2. \quad (16)$$

Постоянные a_0 , a_1 и a_2 приведены в табл. 4 для импульсных пучков.

Коэффициенты в квадратичном приближении для вычисления p_{ion} по методу «двух напряжений» в импульсном пучке излучения в зависимости от отношения напряжений V_1/V_2 , в соответствии с [18]

V_1/V_2	a_0	a_1	a_2
2,0	2,337	-3,636	2,299
2,5	1,474	-1,587	1,114
3,0	1,198	-0,875	0,677
3,5	1,080	-0,542	0,463
4,0	1,022	-0,363	0,341
5,0	0,975	-0,188	0,214

5.1.4. Коррекция на поляризацию

Для цилиндрических и плоскопараллельной камеры Маркуса поляризационный эффект оказывает влияние на измеряемую величину в пределах 1–2% при малой энергии электронов. Эффект поляризации должен измеряться для каждой камеры в стандартной точке в том диапазоне энергии, в котором будут проводиться измерения. Это требование распространяется и на камеры, применяемые для проведения относительных измерений. Если эффект поляризации превышает 2%, такие камеры применять для измерения в пучках электронов нельзя. Измеряются показания прибора M_1 и M_2 для двух противоположных полярностей напряжения и вычисляется их среднее значение. Коэффициент коррекции

$$p_{pot} = (|M_1| + |M_2|) / 2 \cdot |M_1|. \quad (17)$$

5.2. Коэффициент g

Последние расчеты доли энергии вторичных заряженных частиц, преобразующейся в тормозное излучение в воздухе, дали величину 0,003 (для пучка гамма-излучения ^{60}Co) [5].

5.3. Коэффициенты k_i

5.3.1. Произведение коэффициентов $k_{att}k_m$

Данные для произведения этих коэффициентов заимствованы из нового протокола МАГАТЭ [18], опубликованного в 1997 г., и приведены в табл. 1 для различных ионизационных камер. Они были определены путем вычисления среднего значения из большого количества опубликованных экспериментальных данных и данных, рассчитанных по методу Монте-Карло.

5.3.2. Коэффициент коррекции k_{cel}

Коэффициент k_{cel} , учитывающий влияние центрального алюминиевого электрода цилиндрических камер, рассчитан в работе [12] с использованием метода Монте-Карло и принят равным 1,006. Эта величина рекомендуется к использованию новым протоколом МАГАТЭ [18]. Для цилиндрических камер с центральным графитовым электродом и плоскопараллельных камер $k_{cel} = 1$.

5.3.3. Коэффициент коррекции k_{stem}

Как и в большинстве дозиметрических сводов правил, в настоящем протоколе для данного коэффициента принимается значение, равное единице.

5.4. Отношения массовых тормозных способностей для воды и воздуха $s_{w,air}$

Численные данные для величины отношения массовых тормозных способностей воды и воздуха взяты из работы P. Andreo [4]. Результаты получены автором в соответствии с формализмом Спенсера — Аттикса в теории полости Брегга — Грея с шагом 10 кэВ с помощью вычислений методом Монте-Карло для широких моноэнергетических пучков электронов, перпендикулярно падающих на поверхность водного фантома, и дополнительной двухступенчатой коррекции, учитывающей влияние плотности воды (данные по тормозным способностям из рекомендаций 37 ICRU [16]).

P. Andreo et al. [3] изучали влияние энергетического и углового разброса электронов на $s_{w,air}$, и показали, что электроны с широким энергетическим спектром и большим угловым разбросом имеют значения $s_{w,air}$, отличающиеся не более чем на 1% от $s_{w,air}$ для моноэнергетического пучка электронов той же средней энергии в водном фантоме на глубинах от 0 до 3,5 см. В максимуме дозы эта разница не превышает 0,5%. Для спектра электронов шириной 0,5 МэВ и угла их расхождения 5° (обычные условия для электронов, выводимых из медицинских ускорителей) отклонения составляют 0,5% и 0,2% соответственно. Данные по величине $s_{w,air}$, включаемые в $C_{w,e}$, приведены в табл. 2.

5.5. Коэффициенты p_i

5.5.1. Коэффициент p_{wall}

Во всех международных протоколах влияние материала стенок камеры на ионизацию в воздушной полости для пучков электронов призвано пренебрежимо малым и величина p_{wall} принимается равной 1.

5.5.2. Коэффициент p_d

Стандартная камера должна быть расположена так, чтобы ее эффективный центр совпадал со стандартной точкой измерения (максимумом дозы). Только в этом случае $p_d = 1$.

5.5.3. Коэффициент p_f

Коррекция изменения потока электронов необходима для учета дисбаланса между числом электронов, рассеянных из вещества фантома в воздушную полость камеры, и числом электронов, рассеянных из воздушной

полости. Кроме того, полная длина пробега электронов в воздушной полости отличается от длины пробега в аналогичном объеме вещества фантома. Эффекты существуют благодаря разнице в рассеивающей способности воздуха и фантомного вещества.

5.5.3.1. Цилиндрические камеры

Величина коэффициента коррекции p_f зависит от средней энергии электронов E_z на глубине и радиуса ионизационной камеры [8]. Величина p_f определяется из следующих уравнений:

$$E_z < 12 \text{ MeV} \quad p_f = 0,952 + 0,0028 E_z \quad (18)$$

$$E_z \geq 12 \text{ MeV} \quad p_f = 1 - 0,18 \cdot \exp(-0,21 \cdot E_z) \quad (19)$$

5.5.3.2. Камера Маркуса

Для камеры Маркуса определены зависимости в диапазоне энергии от 3 до 14 МэВ. В настоящем протоколе формула для вычисления p_f заимствована из [8] и имеет следующий вид:

$$p_f = 1 - 0,041 \cdot \exp(-0,40 \cdot E_z). \quad (20)$$

Для значений средней энергии электронов на глубине до 2,5 МэВ величина p_f до сих пор остается неопределенной.

5.5.4. Коэффициент p_{cel}

И теоретически, и экспериментально не обнаружено разницы в показаниях в водном фантоме камер Фармера, имеющих графитовые и алюминиевые центральные электроды. Следовательно, величина $p_{\text{cel}} = 1$.

7. ПРИЛОЖЕНИЕ

Протокол измерений для определения поглощенной дозы в воде в стандартных условиях для пучков электронов высоких энергий

Дата ___/___/___ Клиника _____

1. Установка для дистанционной лучевой терапии _____

Номинальная энергия электронов __ МэВ и мощность дозы ускорителя _____ Гр/мин

Средняя энергия электронов на поверхности фантома __ МэВ.

Глубина в воде эффективного центра ионизационной камеры _____ см.

Размер поля _____ см² при РИП = _____ см

2. Ионизационная камера

Модель и заводской номер _____

Внутренний радиус _____ мм, смещение эффективного центра

$Z_{p_{eff}} - Z_p =$ _____ мм

Рабочее напряжение _____ В

Калибровочный коэффициент перехода к керме в воздухе $N_k =$ _____ Гр/Кл

при $p_0 = 101,3$ кПа, $t_0 = 20^\circ\text{C}$, дата калибровки ___/___/___

3. Коррекция показаний прибора

Количество мониторинговых единиц _____ м. е.

Показание	1	2	3	4	5	Среднее
$M_{uncorr} N_k, \text{Гр}$						

– на отклонение температуры и атмосферного давления от стандартных условий:

Атмосферное давление $p =$ _____ кПа, температура $t =$ ___ °С,

$p_p =$ _____

– на рекомбинацию ионов:

		1	2	3	4	5	Среднее
$V_1 = B$	M_1						
$V_2 = B$	M_2						

$p_{ion} =$ _____

- на поляризацию:

		1	2	3	4	5	Среднее
$V_1 = + B$	M_1						
$V_2 = - B$	M_2						

$$P_{pol} = \underline{\hspace{2cm}}$$

4. Определение поглощенной дозы в воде

Откорректированное показание прибора

$$M_u N_k = M_{uncorr} N_k p_{tr} p_{ion} p_{pol} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Гр}$$

Коэффициент перехода от кермы в воздухе к поглощенной дозе в воде $C_{w,e} = \underline{\hspace{1cm}}$

Поглощенная доза в воде в стандартной точке (на глубине максимума дозы) $D_{w,e,ref} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Гр}$

Цена мониторной единицы $\underline{\hspace{1cm}} \text{ сГр/м.е.}$

Инженер-физик _____ Руководитель лаборатории _____