

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

УДК 51-73

ЧАКАН ХИДАЕТ

**РАСЧЁТ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ
ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ «БРИЗ»**

Направление подготовки 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация,
инжиниринг

Выпускная квалификационная
работа защищена

«30» января 2020г.

Оценка хорошо

Секретарь ГЭК Маг

НАЧАЛЬНИК
УЧЕБНОГО ОТДЕЛА
ИЯФ ИЯУ «МИФИ»

КОПИЯ
ВЕРНА

г. Москва

2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИФИ"

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе на тему:

**РАСЧЁТ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ
ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ «БРИЗ»**

Студент
Форма обучения: очная (дневная)

Чакан Х.

Научный руководитель,
старший преподаватель кафедры №1

Могиленец Н.Н.

Рецензент

Смирнов В.В.

Зав. кафедрой №1
доцент, к.ф.-м.н.

Дёмин В.М.

НАЧАЛЬНИК
УЧЕБНОГО ОТДЕЛА
ИЯФ ИТН ЯУ «МИФИ»

КОПИЯ
ВЕРНА

г. Москва

2020

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа была выполнена на тему: «Расчёт радиационной защиты ускорителей программным комплексом БРИЗ».

Работа состоит из введения, литературного обзора, описания программы БРИЗ, расчетная часть, заключения, списка использованной литературы, приложения 1 и 2.

Во введении представлена актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы поставлена цель, а также определены задачи, которые необходимо выполнить для достижения данной цели..

В начале работы приведен обзор основных нормативных документов по проектированию защиты и проведён анализ методов расчёта защиты ускорителей электронов.

В основной части «Расчет защиты» последовательно и подробно приводится:

- Проведёно тестирование расчетного комплекса БРИЗ для задач с спектром тормозных излучений.

- Расчет толщины защиты для спектра отраженных фотонов от бетона, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло.

- Расчет толщины защиты для тормозного излучения с углами растворов, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней.

- Расчет толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения, вылетающего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.

- Проведёно сравнение расчетов толщины защиты по программе БРИЗ, по методу Монте-Карло и согласно СанПин 2.6.1.2573.

В заключении приводится анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности применения программного комплекса БРИЗ для оценки защиты электронного ускорителя.

Выпускная квалификационная работа содержит 59 страниц, 50 рисунков и таблиц, 12 источников и 2 приложения.

СОДЕРЖЕНИЯ

Введение	5
Цели и задачи проекта	5
1. Ускорители	6
1.1. Основные типы ускорителей заряженных частиц	7
2. Особенности защиты ускорителей электронов	7
2.1. Тормозное излучение	8
2.2. Защита от тормозного излучения.	8
2.3. СанПин 2.6.1.2573-10 [1] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ	9
3. Основные нормативы для проектирования защиты	12
4. ПРОГРАММА БРИЗ	15
4.1. Назначение программного комплекса БРИЗ-2	15
4.2. Структура программного комплекса БРИЗ-2	16
5. Расчёт радиационной защиты ускорителей программным комплексом «БРИЗ»	21
5.1. Сравнение расчётов программой БРИЗ с аналитической формулой	21
6. Определение дозы для спектра отраженных от бетона фотонов, рассчитанной методом Монте-Карло и программным комплексом БРИЗ;	23
6.1. Определение дозы для спектра отраженных от бетона фотонов, рассчитанной методом Монте-Карло.	23
6.2. Расчет толщины защиты для спектра отраженных фотонов от бетона с учетом категории помещений	26
6.2.1. Определение толщины защиты для спектра отраженных фотонов с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ в обратном направлении относительно пучка электронов ($\Theta = 180^\circ$).	26
6.2.2. Расчет защиты для спектра отраженных фотонов с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МэВ в обратном направлении относительно пучка электронов ($\Theta = 180^\circ$).	29
6.2.3. Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями	32
7. Расчет толщины защиты для тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней	32
7.1. Определение толщины защиты для спектра тормозного излучения с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МэВ , выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней	32
7.2. Определение толщины защиты для спектра тормозного излучения с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ , выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней	36
7.3. Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями	40
8. Расчет защиты для спектра фотонов тормозного излучения, выходящего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.	40

8.1.Спектр фотонов тормозного излучения, выходящего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.....	40
8.2.Расчет толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения, вылетающего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.	41
8.2.1.Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=0^\circ$).....	42
8.2.2.Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=90^\circ$).....	45
8.2.3.Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=180^\circ$).....	48
8.2.4 Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями	51
9.Сравнение результатов расчета защиты различными методами для спектров, рассчитанных различными авторами, с различными граничными энергиями	51
Заключение	53
Список использованной литературы	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	56

Введение

Лет 10...20 назад в качестве излучения, в основном, использовалось гамма-излучение ^{60}Co , рентгеновское излучение и пучки электронов. В последние годы внедряются установки для лечения нейтронами, протонами и тяжелыми ионами, также интенсивно строятся специальные медицинские ротационные электронные ускорители, генерирующие тормозное излучение. Различные виды излучений в зависимости от их физических свойств и особенностей взаимодействия с облучаемой средой создают в организме различные пространственные распределения поглощенной дозы.

Ускорители элементарных частиц являются универсальными источниками излучения, позволяющими менять вид излучения, регулировать энергию излучения, размеры и формы полей облучения и тем самым индивидуализировать программу лучевой терапии опухолей различных локализаций.

При взаимодействии ускоренных электронов с окружающей средой возникает тормозное излучение [1]. Электроны в результате торможения о мишень генерируют сильно проникающее тормозное излучение (ТИ), используемое в лучевой терапии.

Радиационная защита ускорителя (помещений, в которых расположен ускоритель) должна изготавливаться из материалов, наиболее эффективно ослабляющих первичное электронное или тормозное излучение.

Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, должна проектироваться таким образом, чтобы суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышали величин, регламентируемых НРБ-99/2009[2].

На инженерных методах расчета основаны быстрые и относительно простые программы расчета дозовых характеристик полей фотонного излучения, чтобы рассчитать радиационную защиту от тормозного излучения электронных ускорителей.

Цели и задачи проекта

- **Цель работы:** Расчёт радиационной защиты ускорителей программным комплексом «БРИЗ»

1. Анализ методов расчёта защиты ускорителей
2. Тестирование расчётного комплекса БРИЗ для задач с непрерывным спектром излучения
3. Расчет мощностей доз в расчетных точках без радиационной защиты
4. Определение необходимых кратностей ослабления с учетом категории помещений;
5. Сравнение результатов расчета защиты различными методами для спектров, рассчитанные различными авторами, при разных граничных энергиях спектра

1. Ускорители

Ускорители- класс устройств, с помощью электрических и магнитных полей разгоняющих заряженные частицы до высоких энергий. Ускорители различаются типом ускоряемых частиц, характеристиками пучка (энергией, интенсивностью и др.), а также конструкцией устройства. Наиболее широко распространены ускорители элементарных частиц - электронов и протонов.

Область применения ускорителей достаточно широка: для физических исследований (радиоактивный анализ, рентгеновский эмиссионный анализ), в промышленности (ионная имплантация, электронно-лучевая сварка и т.д.) и медицине (лучевая терапия). При относительно низких энергиях ускоренные частицы используют, например, для получения изображения на экране телевизора или электронного микроскопа, генерации рентгеновских лучей (электронно-лучевые трубки), разрушения раковых клеток, уничтожения бактерий. При ускорении заряженных частиц до энергий, превышающих 1 МэВ их используют для изучения структуры микрообъектов (например, атомных ядер) и природы фундаментальных сил. В этом случае ускорители заряженных частиц выполняют роль источников пробных частиц, зондирующих изучаемый объект. Ускорители также применяются для более глубокого исследования уже существующих элементарных частиц. Для них характерно ускорение до энергий порядка 100 МэВ. Чем меньше размеры исследуемой структуры, тем меньше должна быть длина волны - соответственно тем большей энергией должен обладать поток частиц. После взаимодействия с исследуемым веществом, результат этого взаимодействия фиксируется на детекторе и далее анализируется [3].

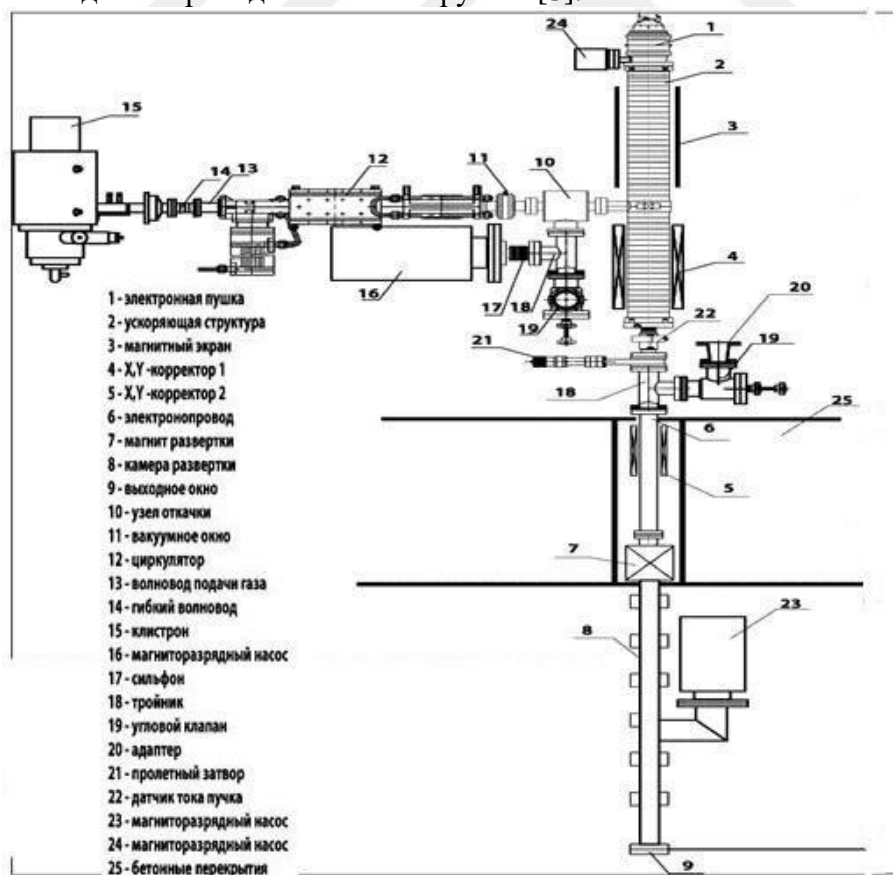


Рис.1.1 Структурная схема ускорителя электронов УЭЛВ-10-10-С-70

1.1. Основные типы ускорителей заряженных частиц

Любой ускоритель состоит из трёх основных частей – инжектора, откуда выпускаются заряженные частицы, ускорительной системы в вакууме, где еще низкоэнергетические частицы ускоряются до необходимых энергий, и системы вывода пучка. В зависимости от траектории движения ускоряемых частиц ускорители делятся на два основных вида - линейные и циклические.

Таблица 1.1

Таблица ускорителей, как источников излучений[4]

№	Типы ускорителей	Ускоряемые частицы	T_0 , МэВ	Излучение, определяющее толщину защиты	Наведенная активность
1	Электростатические, микротроны, бетатроны, линейные	Электроны	Менее 15	Тормозное излучение	Нет*
2	Бетатроны, линейные, синхротроны	Электроны	Менее 150	Тормозное излучение, быстрые нейтроны	Часто надо учитывать*
3	Синхротроны, линейные	Электроны	Более 150	Тормозное излучение, быстрые нейтроны	Часто надо учитывать*
4	Электростатические, циклотроны, линейные	Тяжелые заряженные частицы	Менее 30 МэВ/нукл.	Быстрые нейтроны	Часто надо учитывать*
5	Линейные, синхроциклотроны, синхротроны, синхрофазотроны	Тяжелые заряженные частицы	Менее 10 ГэВ/нукл.	Нейтроны	Всегда надо учитывать*
6	Синхрофазотроны	Тяжелые заряженные частицы	Более 10 ГэВ/нукл.	Адроны, мюоны	Всегда надо учитывать*

2. Особенности защиты ускорителей электронов

Ускорители электронов являются наиболее многочисленным типом ускорителей и широко используются в науке, промышленности, медицине. В зависимости от энергии ускоряемых электронов эти ускорители могут быть источниками электронов, тормозного излучения, фотонейтронов и даже мюонов.

В большинстве случаев ускорители электронов используются как источники тормозного излучения. При этом ускоренные электроны направляются на внутренние или внешние мишени. Но тормозное излучение возникает так-же при взаимодействии электронов с конструктивными элементами ускорителя, регистрирующей аппаратурой и защитой.

2.1 Тормозное излучение

Заряженные частицы при движении в веществе сталкиваются с атомами и, отклоняясь в их электрическом поле, излучают электромагнитную энергию.

Электромагнитное излучение, которое появляется в этих столкновениях, называют тормозным излучением. Соответствующие потери энергии заряженных частиц называют тормозными (радиационными) потерями энергии.

Интенсивность тормозного излучения пропорциональна квадрату ускорения частицы, следовательно, обратно пропорциональна квадрату ее массы. Отсюда следует важный вывод: тормозное излучение – это взаимодействие, которое существенно лишь для легких заряженных частиц. Например, при одной и той же энергии, интенсивность тормозного излучения у протона примерно в $3 \cdot 10^6$ раз меньше, чем у электрона.

2.2. Защита от тормозного излучения.

Мишени-конвертеры, которые используются в электронных ускорителях для генерации тормозного излучения, относятся к толстым мишеням. В них электронный пучок теряет большую часть своей энергии. Для толстых мишеней между выходом тормозного излучения из мишени (числом фотонов, их плотностью потока, интенсивностью, мощностью дозы) и атомным номером ее вещества существует линейная зависимость, так как часть тормозного излучения (в основном низкоэнергетическая) поглощается в самой мишени. Зависимость $\sim Z^2$ имеет место только для очень тонких мишеней, толщина которых сравнима с длиной свободного пробега первичных электронов.

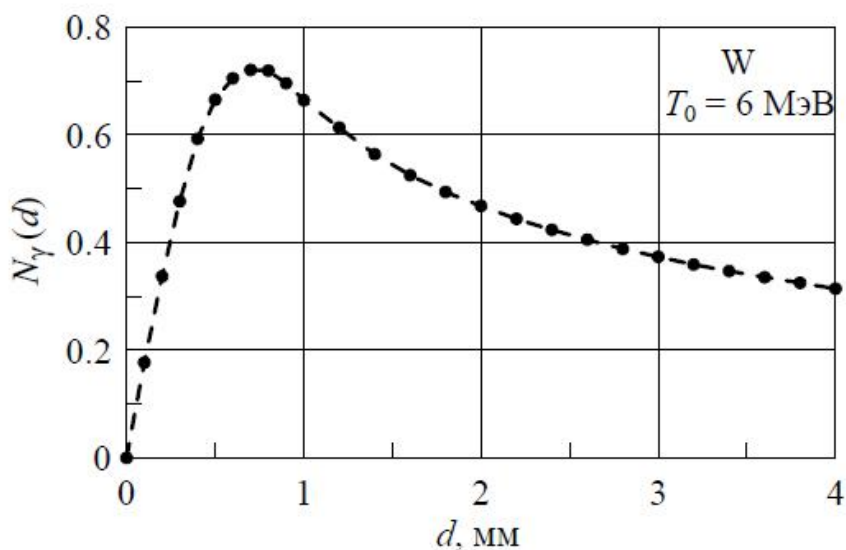


Рис.2.1 Зависимость числа фотонов тормозного излучения от толщины вольфрамовой мишени

На рис.2.1 приведена зависимость от толщины вольфрамовой мишени числа фотонов тормозного излучения с энергиями более 5 кэВ, выходящих из мишени вперед в направлении электронного пучка с энергией 6 МэВ (расчет методом Монте-Карло). С увеличением толщины мишени выход тормозного излучения быстро возрастает, так как увеличивается число атомов вещества, в поле которых электрон теряет энергию в процессах тормозного излучения. Но при толщине, равной примерно 1/3 среднего пробега первичного электрона выход тормозного излучения достигает максимального значения и затем медленно уменьшается. Такая зависимость является следствием, во-первых, поглощения низкоэнергетических фотонов тормозного излучения в самой мишени, а во-вторых, уменьшением с толщиной мишени энергии электронов и сечения тормозного излучения.

Отметим еще один приближенный метод. Если известна кратность ослабления мощности дозы тормозного излучения, то для энергий электронного пучка до 100 МэВ толщину защиты из свинца, железа и бетона можно оценить из кривых ослабления тормозного излучения в этих материалах, которые приведены в работах [5, 6].

2.3. СанПиН 2.6.1.2573-10 [1] для ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ

Расчет радиационной защиты ускорителя электронов включает три этапа:

- Расчет мощностей доз в расчетных точках без радиационной защиты;
- Определение необходимых кратностей ослабления полученных мощностей доз, с учетом категории помещений;
- Выбор материалов и расчет толщин радиационной защиты, обеспечивающих необходимые кратности ослабления.

Необходимая кратность ослабления излучения в защите определяется по формуле:

$$k = \frac{D_{\text{п}}}{R^2 \cdot D_{\text{пр}}}$$

где: $D_{\text{п}}$ — мощность поглощенной дозы по БРИЗу, $D_{\text{пр}}$ - проектная мощность дозы, мкЗв/ч.

Значения проектной мощности дозы за радиационной защитой ускорителя рассчитываются исходя из пределов дозы (ПД) для соответствующих категорий облучаемых лиц и возможной продолжительности их пребывания в смежных помещениях или на прилегающих территориях с использованием соотношения:

$$D_{\text{пр}} = \frac{10^3 \cdot \text{ПД}}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700}$$

где: 10^{-3} - коэффициент перехода от мЗв к мкЗв,

ПД - предел дозы, мЗв в год,

2 - коэффициент запаса,

T - максимальная доля времени, проводимого людьми в данном помещении,

n - коэффициент сменности, учитывающий возможность двухсменной работы ускорителя,

1700 - стандартизованная продолжительность работы персонала за год при односменной работе, часов в год.

В таблице 2.1 приведены рекомендуемые значения проектной мощности дозы для указанных условий.

В таблице 2.2 приведены рекомендуемые значения толщины защиты из бетона (см) для различных кратностей ослабления K

Определив необходимую кратность ослабления мощности дозы излучения и эффективную энергию тормозного излучения ($E_{эф}$), выбирают материал защиты из СанПиН 2.6.1.2573-10 [1], находят необходимую толщину радиационной защиты для получения заданной кратности ослабления. Эффективную энергию тормозного излучения ($E_{эф}$) в зависимости от энергии электронов (E_0) определяют следующим образом:

$$E_{эф} = \frac{2}{3} E_0 \text{ при } E_0 \leq 1,7 \text{ МэВ}$$

$$E_{эф} = \frac{E_0}{2} \text{ при } 1,7 \text{ МэВ} < E_0 < 10 \text{ МэВ}$$

$$E_{эф} = 5 \text{ МэВ при } 10 \text{ МэВ} < E_0 < 15 \text{ МэВ}$$

$$E_{эф} = \frac{E_0}{3} \text{ при } 10 \text{ МэВ} < 15 \text{ МэВ}$$

Таблица 2.1

Проектная мощность дозы ($D_{пр}$) за стационарной защитой ускорителя электронов для помещений и территории различного назначения[1]

Помещение, территория	T	n	ПД	P_g
	отн.ед.	отн.ед.	мЗв/ год	мкЗв/ч
Помещения постоянного пребывания персонала группы А (все помещения, входящие в состав отделений, кабинетов лучевой терапии, комната управления (пультовая)).	1	1	20	6,0
Помещения временного пребывания персонала группы А	0,5	1	20	12,0
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя в которых имеются постоянные рабочие места персонала группы Б.	1	1,2	5	1,2
Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя, без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, уборная, кладовая и др.).	0,25	1,2	5	5,0
Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и т.п.).	0,06	1,2	5	20
Палаты стационара (не радиологические), смежные по вертикали и горизонтали с отделениями, кабинетами лучевой терапии, помещения эпизодического пребывания лиц, не отнесенных к персоналу, смежные по вертикали и горизонтали с рабочей камерой (процедурной) ускорителя.	0,25	2	1	0,6
Помещения, в которых имеются постоянные рабочие места лиц, не отнесенных к персоналу.	1	1,2	1	0,25
Территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя.	0,12	2	1	1,2

Таблица 2.2

Толщина защиты из бетона (см) для различных кратностей ослабления K

K	$E_{\text{эф}}, \text{МэВ}$														
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0
10	7,2	13,5	19,0	22,5	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	34,0	37,6	43,4	47,5	51,6
20	8,2	15,3	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	42,5	47,5	54,0	58,7	64,6
50	9,9	18,8	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	51,0	58,1	66,9	72,8	81,6
100	11,2	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3	65,7	77,5	84,5	95,1
$5 \cdot 10^2$	13,8	26,0	36,0	43,9	50,5	54,5	57,3	59,8	62,5	64,6	74,8	84,5	101	110	124
10^3	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,3	70,4	81,7	87,6	110	121	138
$5 \cdot 10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,2	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97,0	111	133	147	167
10^4	20,1	35,2	48,5	60,3	69,3	74,5	79,1	82,9	86,2	89,2	104	119	143	157	179
$5 \cdot 10^4$	23,3	42,3	56,4	68,6	79,0	84,7	88,7	93,4	97,9	102	120	136	165	181	207
10^5	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	89,0	93,5	98,1	102	107	127	144	174	191	218
$5 \cdot 10^5$	44,8	61,5	73,7	83,7	92,5	99,3	104	110	115	122	142	162	196	215	247
10^6	49,3	66,4	79,8	89,8	97,0	104	114	114	120	124	150	171	205	225	261
$5 \cdot 10^6$	59,4	79,7	91,6	101	107	114	120	126	132	137	166	189	227	250	288
10^7	64,0	84,9	95,7	106	111	119	125	130	136	142	173	197	236	259	299

3. Основные нормативы для проектирования защиты

Воздействие ионизирующего излучения на человека может быть обусловлено внешним, внутренним или смешанным (внешним и внутренним) облучением. Ионизирующее излучение в тканях живых организмов ионизирует атомы и молекулы. Ионизация сопровождается особыми химическими и биологическими процессами в клетках ткани. Степень поражения организма зависит от того, какие органы или ткани подверглись облучению, а также от поглощенной в них дозы излучения и созданного этой дозой биологического эффекта.

Биологический эффект зависит от дробности облучения. Однократное облучение большой дозой приносит больший вред, чем длительное облучение малыми дозами, так как в последнем случае организм успевает частично восстановить поврежденные функции.

В настоящее время действуют «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2010». Они распространяются на все предприятия и учреждения министерств и ведомств, где возможны производство, обработка, применение, хранение, переработка, обезвреживание, транспортировка естественных и искусственных радиоактивных веществ, и других источников ионизирующих излучений.

В соответствии с НРБ-99/2010 устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

1. Персонал – лица, работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

2. Все население, включая лиц персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц по НРБ-99/2010 установлено 3 класса нормативов:

1. Основные пределы доз (ПД);

2. Допустимые уровни (от одного вида излучения) – это производные от основных пределов доз: пределы годового поступления, объемные допустимые среднегодовые активности, допустимая мощность дозы и др.;
3. Контрольные уровни (дозы, активности и др.). Их значения должны быть ниже допустимых уровней.

Примечания:

1) Все нормативные значения приводятся для категории персонала только группы А.

2) Дозовые пределы и допустимые уровни персонала группы Б не должны превышать $\frac{1}{4}$ значений группы А.

Основные пределы доз не включают в себя дозы:

- от природных источников;
- от медицинских источников;
- от радиационных аварий.

На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Эффективная доза для персонала группы А за период трудовой деятельности (50 лет) не должна превышать 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

К работе с источниками ионизирующего излучения допускаются лица не моложе 18 лет и не имеющие медицинских противопоказаний.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, вводятся дополнительные ограничения. Кроме того, администрация предприятия обязана перевести женщину на период беременности и грудного вскармливания ребенка на работы не связанные с ионизирующим излучением. Для студентов и учащихся не моложе 16 лет, проходящих обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

Проектирование защиты от внешнего облучения персонала и населения необходимо проводить с учетом назначения помещений, категорий облучаемых лиц и длительности облучения с коэффициентом запаса по годовой эффективной дозе не менее 2.

Значения проектной мощности эквивалентной дозы для стандартной продолжительности пребывания в помещениях и на территориях персонала и населения с коэффициентом запаса 2 приведены в табл. 3.1 [8]:

Таблица 3.1

Мощность эквивалентной дозы, используемая при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения.

Категория облучаемых лиц		Назначение территорий и помещений	Проектная мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч	Продолжительность облучения, ч/год
Персонал	Группа А	Помещения постоянного пребывания персонала	6	1700
Помещения временного пребывания персонала		12	850	
Группа Б	Помещения организации и территория СЗЗ, где находится персонал группы Б		1,2	2000
Население	Любые другие помещения и территории		0,06	8800

Нормативные документы НРБ-2009 и ОСПОРБ-2010 используются для безопасности человека во всех условиях воздействия ионизирующего излучения. При эксплуатации электронных ускорителей используется документ СанПиН 2.6.1.2573-2010 [8] для ускорителей на энергии до 100 МэВ трех типов: импульсных, промышленных и медицинских. Согласно данному документу при проектировании защиты помещений корпуса лучевой терапии используются установленные данные, такие как проектная мощность дозы (ДМД), предел дозы и максимальная доля времени, проводимого людьми в данном помещении, представленные в табл. 2.1.

4.ПРОГРАММА БРИЗ

4.1.Назначение программного комплекса БРИЗ-2

Быстрый Расчет Излучений и Защиты - программный комплекс расчета БРИЗ, предназначенный для оперативного расчёта мощности дозы от источников гамма-излучения различной геометрической формы при наличии защиты или без нее. В программе БРИЗ было принято, что в каждой точке все радионуклидные источники различных геометрических форм и размеров испускают излучение изотропно.

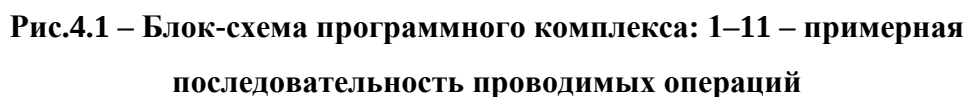
Дозовые характеристики поля вычисляются с учетом и без учета рассеянного излучения в источнике и защите как на момент времени, соответствующий исходным данным, так и с временной задержкой, учитывая радиоактивный распад радионуклидов, входящих в материал источника. Когда используется временной модуль, тогда возможно рассчитать поглощенные и эффективные дозы за определенный промежуток времени, отсчитываемый от момента задания активности источника.

Программа БРИЗ способна определять дозовые характеристики фотонных полей не только от радионуклидных источников и от источников фотонов, имеющих непрерывное распределение по энергии в диапазоне энергий фотонов источника от 0 до 15 МэВ. Это дает возможность решать задачи с непрерывными спектрами тормозного излучения.

В программе можно получить характеристики источников фотонов и характеристика их ослабления в различных материалах реализованы во введенном разделе программы БРИЗ – «Справочник». В этом разделе программы БРИЗ можно оперативно получить значения керма-постоянной радионуклида; коэффициентов ослабления фотонов для разных материалов защиты при заданной энергии испускаемых источником фотонов; удельную мощность поглощенной дозы в воздухе или эффективную мощность дозы для фотонов определенной энергии; для заданного материала защиты и ее толщины при определенной энергии фотонов рассчитать дозовый фактор накопления фотонов.

Программа рассчитывает дозовый фактор накопления для точечного изотропного моноэнергетического источника фотонов и гетерогенной защиты, имеющей не более 5 слоев разных материалов. Раздел справочника «Спектр фотонов источника» позволяет

4.2. Структура программного комплекса БРИЗ-2



Для объемных источников в блоке источника существует блок материала источника, в котором из заданных в базе данных 29 материалов можно выбрать любой с одновременным заданием его плотности.

16

источника. Геометрический блок устанавливает следующие ограничения на расположение детектора в расчетной композиции:

Таблица 4.1

Геометрии источников, для которых реализован расчет

№	Тип источника
Точечные источники	
1	Точечный
Линейные источники	
2	Отрезок
3	Прямоугольный контур (рамка)
4	Кольцевой
Поверхностные источники	
5	прямоугольная пластина
6	круговая пластина
7	поверхность прямоугольного параллелепипеда
8	поверхность шара
9	поверхность цилиндра
10	поверхность трубы
Объемные	
11	прямоугольный параллелепипед
12	Шар
13	Цилиндр
14	Труба

- детектор не может располагаться на поверхности источника и внутри него. Минимальное расстояние до поверхности источника равно максимальному размеру расчетной ячейки.

- детектор не может располагаться внутри защитного экрана или перед ним.

Данные ограничения отслеживаются программно, при их нарушении выдается диагностические сообщения, и расчет не производится. Взаимное расположение источника и детектора одновременно представляется в виде схемы на мониторе.

В настоящее время сформированы файлы по радиационным характеристикам материалов источника и защиты для 23 элементов (Al, Ar, B, Be, C, Ca, Cu, Fe, Gd, K, La, Mg, Mo, N, Na, O, P, Pb, S, Si, Sn, U, W) и 6 веществ (вода, бетон, оксид урана, гексафторид урана, воздух). Факторы накопления для оксидов и гексафторида урана получены в рамках выполнения настоящей работы по созданию программы БРИЗ [8].

Их особенность состоит в том, что они рассчитаны сразу с учетом всех процессов взаимодействия фотонов с этими материалами, но ограничены диапазоном энергий фотонов 0,01-5 МэВ.

Для них указано значение массового коэффициента ослабления в кг/м^2 и 16 значений фактора накопления для табулированных значений μd (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40). Число таких данных соответствует разбиению по энергии в МэВ .

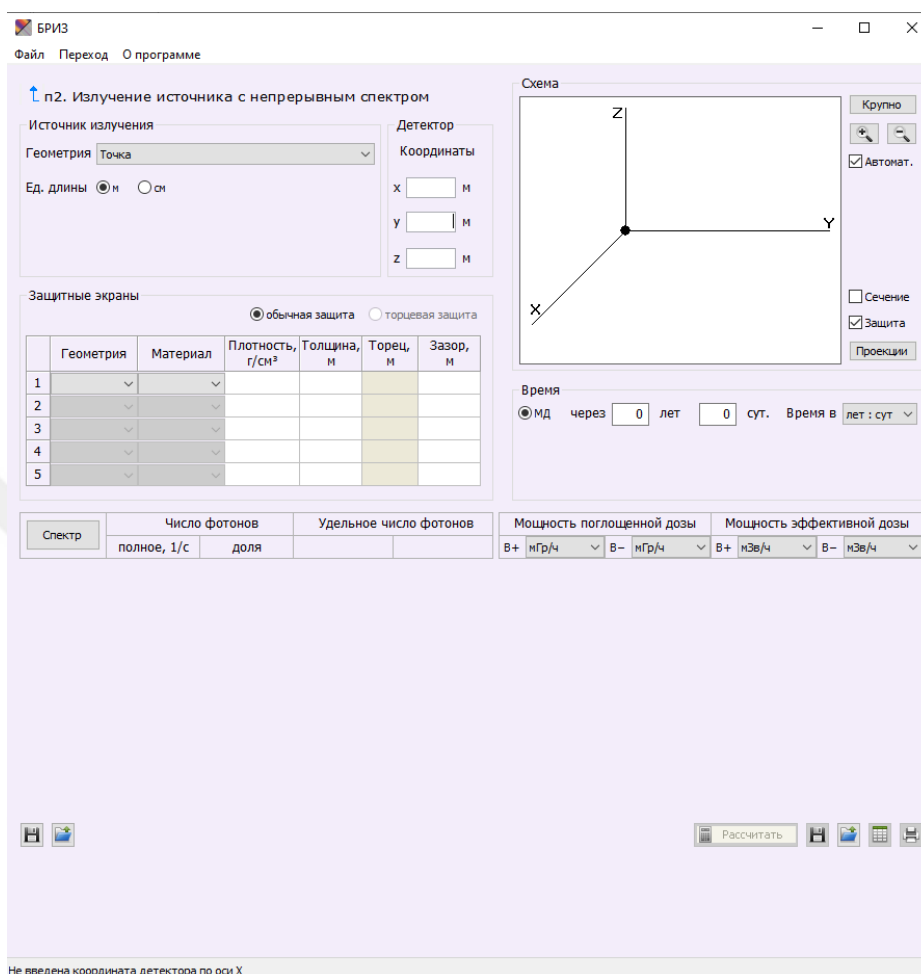


Рис.4.2-Вид основного окна задачи п1 программы «БРИЗ-2».

Программа вычисляет две дозовые характеристики поля: поглощенную дозу (мощность дозы) в воздухе и эффективную дозу (мощность дозы) (под эффективной дозой понимается средняя поглощенная доза в ткани, умноженная на радиационный коэффициент для фотонов $w_R=1$). Результаты расчета выдаются для каждого радионуклида, а также в сумме, с учетом и без учета рассеянного излучения. Расчет мощности дозы может выполняться для указанных активностей нуклидов (на момент времени $t = 0$) или спустя любой заданный интервал времени с учетом радиоактивного распада. Доза излучения может быть определена через заданный интервал времени, отсчитываемый от начального момента $t=0$, для которого введены данные по активности источника, за любой промежуток времени после этого интервала. База данных по

радионуклидам включает 202 радионуклида и количество выбранных нуклидов не должно превышать 25.

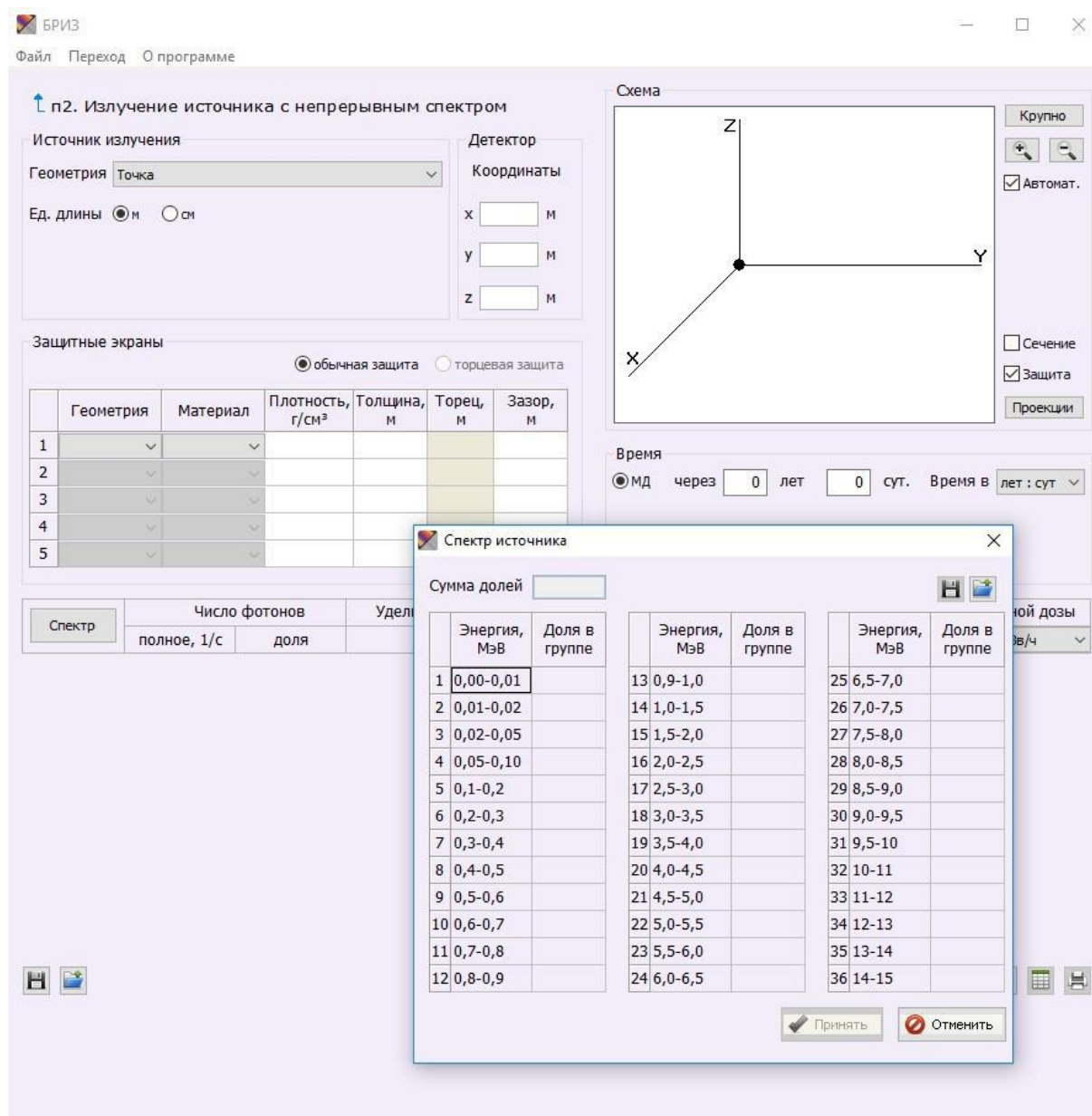


Рис.4.3 Вид основного окна задачи n2 программы «БРИЗ-2».

В окне приведено 36-групповое представление спектра фотонов источника: первая графа указывает границы энергетических групп спектра фотонов, вторая графа заполняется пользователем, который указывает либо абсолютное число испускаемых источником фотонов с энергиями, принадлежащими соответствующей энергетической группе, или долю числа фотонов. Для источников с непрерывным спектром испускаемых фотонов рассчитываются только мощности дозы на начальный момент времени. Пользователь может выбрать удобные для него единицы измерения доз фотонов.

Величины мощностей дозы ограничены снизу числом $1,00\text{E-}99$. Если результат получается меньше этого числа, он автоматически заменяется нулем.

Размеры источника не могут быть нулевыми, кроме двух из трех размеров для линейного источника. Также метрические размеры не могут быть меньше, чем $0,0001$ м (или $0,01$ см). В случае ввода меньшей величины она автоматически заменяется величиной $0,0001$ (если установлены метры) или $0,01$ (если установлены сантиметры).

Полная мощность поглощенной дозы в воздухе от элементарной ячейки объемного источника определяется по формуле:

$$d \dot{D}_{mi} = \sum_j \frac{E_j \mu_j^{en} n_j}{4\pi r_m^2} 1,6 \times 10^{-13} \times 10^3 \exp(-\mu_j d_m - \mu_{sj} d_s) B_d(E_j, \mu_j d_m, \mu_{sj} d_s) \delta(E_j) \delta_s(E_j) \quad (4)$$

В приведенных формулах: $d \dot{D}_m(t)$ – мощность поглощенной дозы в воздухе в точке детектирования на момент времени t , создаваемая излучением радионуклидов, находящихся в m -ой ячейке источника фотонов объемом dV_m , суммарной удельной активностью A_v , заданной на момент времени $t=0$, Гр/с; n_i – относительная доля активности i -го нуклида в суммарной удельной активности источника в момент времени $t=0$, λ_i – постоянная радиоактивного распада i -го нуклида, с^{-1} ; $d \dot{D}_{mi}$ – мощность поглощенной дозы в воздухе в точке детектирования, создаваемая излучением i -го радионуклида активностью 1 Бк, находящегося в центре m -ой ячейки, испускающего n_j фотонов на один акт распада с энергией E_j в МэВ, Гр/с; μ_j, μ_{sj} – линейный коэффициент ослабления [8] фотонов с энергией E_j в материале источника и защиты соответственно, см^{-1} ; $B_d(E_j, \mu_j d_m, \mu_{sj} d_s)$ – дозовый фактор накопления для точечного изотропного источника в бесконечной среде для материала источника и защиты; d_m, d_s – толщина материала источника и защиты, соответственно, на пути от выделенной m -ой ячейки источника до точки детектирования, см; r_m – расстояние между центром ячейки и точкой детектирования, см; $\delta(E_j), \delta_s(E_j)$ – поправка на барьерность среды для материала источника и защиты, соответственно, для фотонов с энергией E_j ; μ_{enj} – массовый коэффициент поглощения энергии фотонов с энергией E_i в воздухе, $\text{см}^2/\text{г}$; $1,6 \times 10^{-13}$ – коэффициент перевода 1 МэВ в джоули, Дж/МэВ; 10^3 – коэффициент перевода 1 кг в граммы, г/кг. [9]

5. Расчёт радиационной защиты ускорителей программным комплексом «БРИЗ»

5.1 Сравнение расчётов программой БРИЗ с аналитической формулой

Для простой геометрии источника (точечный источник) проводились расчеты как с помощью программа БРИЗ так и по аналитической формуле.

Для точечных источников тормозного излучения, испускаемого мишенью ускорителя, соответственно рассчитывались мощности поглощенной дозы на различных расстояниях между источником и детектором без защиты. Проводились расчеты спектра тормозного излучения, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло (на рис. 5.1)

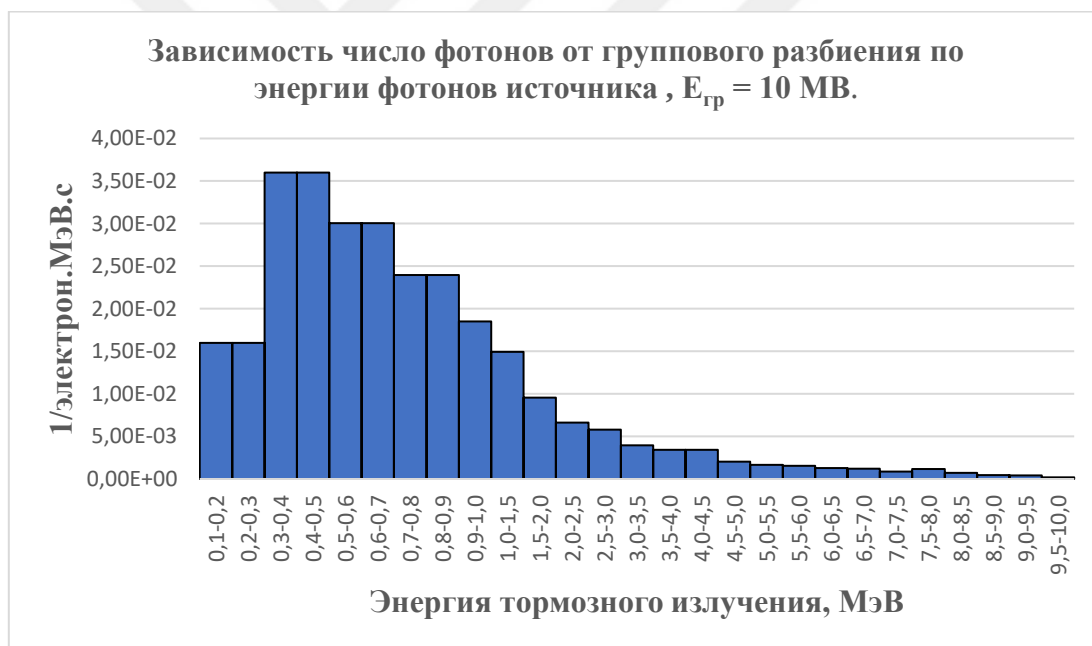


Рис.5.1

Рассчитали мощность поглощенной дозы для точечной изотропной источники по формуле :

$$D_{\Phi} = E_{\gamma} * \varphi_{\gamma} * \mu_{\text{пог}}^{\text{ткань}} * 1,6 * 10^{-13} \quad (5)$$

, где D_{Φ} – мощность поглощенной дозы, мкГр/с

$\mu_{\text{пог}}^{\text{ткань}}$ – массовый коэффициент поглощения, м²/кг

r – расстояние между источником и детектором, м

φ_{γ} – плотность потока, 1/см²*с

E_{γ} – Энергия тормозного излучения, МэВ

(Мы находим массовый коэффициент поглощения из Справочника [7])

В табл. 5.1,5.2 приведен результаты расчетов, полученные с программой БРИЗ (Дп) и по формуле (Дф).

Таблица 5.1.

Мощность поглощённой дозы без защиты для группового разбиения по энергии фотонов источника

E(10),МэВ	Ан. ,формула, мкГр/ч	БРИЗ, мкГр/ч	δ, %
0,1-0,2	1,48E+07	1,48E+07	0,34
0,2-0,3	2,73E+07	2,74E+07	0,19
0,3-0,4	9,06E+07	9,07E+07	0,09
0,4-0,5	1,19E+08	1,18E+08	0,43
0,5-0,6	1,21E+08	1,21E+08	0,08
0,6-0,7	1,41E+08	1,42E+08	0,40
0,7-0,8	1,29E+08	1,29E+08	0,20
0,8-0,9	1,44E+08	1,44E+08	0,08
0,9-1,0	1,22E+08	1,22E+08	0,04
1,0-1,5	6,14E+08	6,16E+08	0,33
1,5-2,0	5,04E+08	5,04E+08	0,06
2,0-2,5	4,17E+08	4,18E+08	0,14
2,5-3,0	4,19E+08	4,21E+08	0,55
3,0-3,5	3,18E+08	3,17E+08	0,28
3,5-4,0	3,05E+08	3,03E+08	0,59
4,0-4,5	3,31E+08	3,30E+08	0,20
4,5-5,0	2,11E+08	2,10E+08	0,69
5,0-5,5	1,83E+08	1,83E+08	0,21
5,5-6,0	1,85E+08	1,83E+08	0,86
6,0-6,5	1,64E+08	1,64E+08	0,06
6,5-7,0	1,60E+08	1,59E+08	0,32
7,0-7,5	1,21E+08	1,21E+08	0,01
7,5-8,0	1,74E+08	1,74E+08	0,23
8,0-8,5	1,09E+08	1,09E+08	0,13
8,5-9,0	7,58E+07	7,67E+07	1,23
9,0-9,5	6,85E+07	6,95E+07	1,51
9,5-10,0	3,70E+07	3,71E+07	0,27
	СУММА		
	5,30E+09	5,29E+09	0,27

Таблица 5.2.

Мощность поглощённой дозы без защиты для различных расстояний

R, м	D_{ϕ} , мкГр/ч	D_{π} , мкГр/ч	δ , %
0,1	5,30E+11	5,29E+11	0,27
0,2	1,33E+11	1,32E+11	0,45
0,5	2,12E+10	2,12E+10	0,08
1	5,30E+09	5,29E+09	0,27
1,5	2,36E+09	2,35E+09	0,31
2	1,33E+09	1,32E+09	0,45

Сравнения данных при групповом разбиении по энергии фотонов источника, полученные по программе БРИЗ и по аналитической формуле, между источником и детектором $R=1,0$ м, показывает, что погрешности результатов не превышают 1,5 %

Сравнения данных по разным расстояниям, полученных результаты из программой БРИЗ и по аналитической формуле, между источником и детектором показывает, что погрешности результаты не превышает 0,45%

6.Определение дозы для спектра отраженных от бетона фотонов, рассчитаной методом Монте-Карло и прогаммным комплексом БРИЗ;

6.1. Определение дозы для спектра отраженных от бетона фотонов, рассчитаной методом Монте-Карло.

По программе БРИЗ был произведен расчет дозы для различных спектров. Для этого была выполнена преобразование разбиения энергии. Например, для спектра отраженных фотонов с граничной энергией ($E_{гр} = 10$ МэВ) преобразование представлена в таблице. (6.1).

Таблица 6.1

Преобразование энергетического разбиения спектра отраженных фотонов с граничной энергией ($E_{гр} = 10$ МэВ)

	E (), МэВ	$N(E)$
1	0,04	5,50E-04
2	0,06	1,80E-02
3	0,08	8,50E-02
4	0,1	1,60E-01
5	0,12	1,80E-01
6	0,14	1,80E-01
7	0,16	1,40E-01
8	0,18	1,30E-01
9	0,2	1,10E-01
10	0,22	9,00E-02
11	0,24	7,10E-02
12	0,26	2,20E-02
13	0,28	6,50E-03
14	0,3	2,30E-03
15	0,32	1,70E-03
16	0,34	1,30E-03
17	0,36	1,10E-03
18	0,38	8,20E-04
19	0,4	8,20E-04
20	0,42	9,00E-04
21	0,44	7,50E-04
22	0,46	8,10E-04
23	0,48	6,60E-04
24	0,5	6,80E-04
25	0,52	1,70E-02
26	0,54	1,00E-03



E (), МэВ	$N(E)$
0,02-0,05	3,79E-03
0,05-0,1	1,46E-01
0,1-0,2	6,26E-01
0,2-0,3	2,01E-01
0,3-0,4	5,30E-03
0,4-0,5	3,16E-03
0,5-0,6	1,46E-02

Расчет программой БРИЗ представлен на рисунке 6.1.

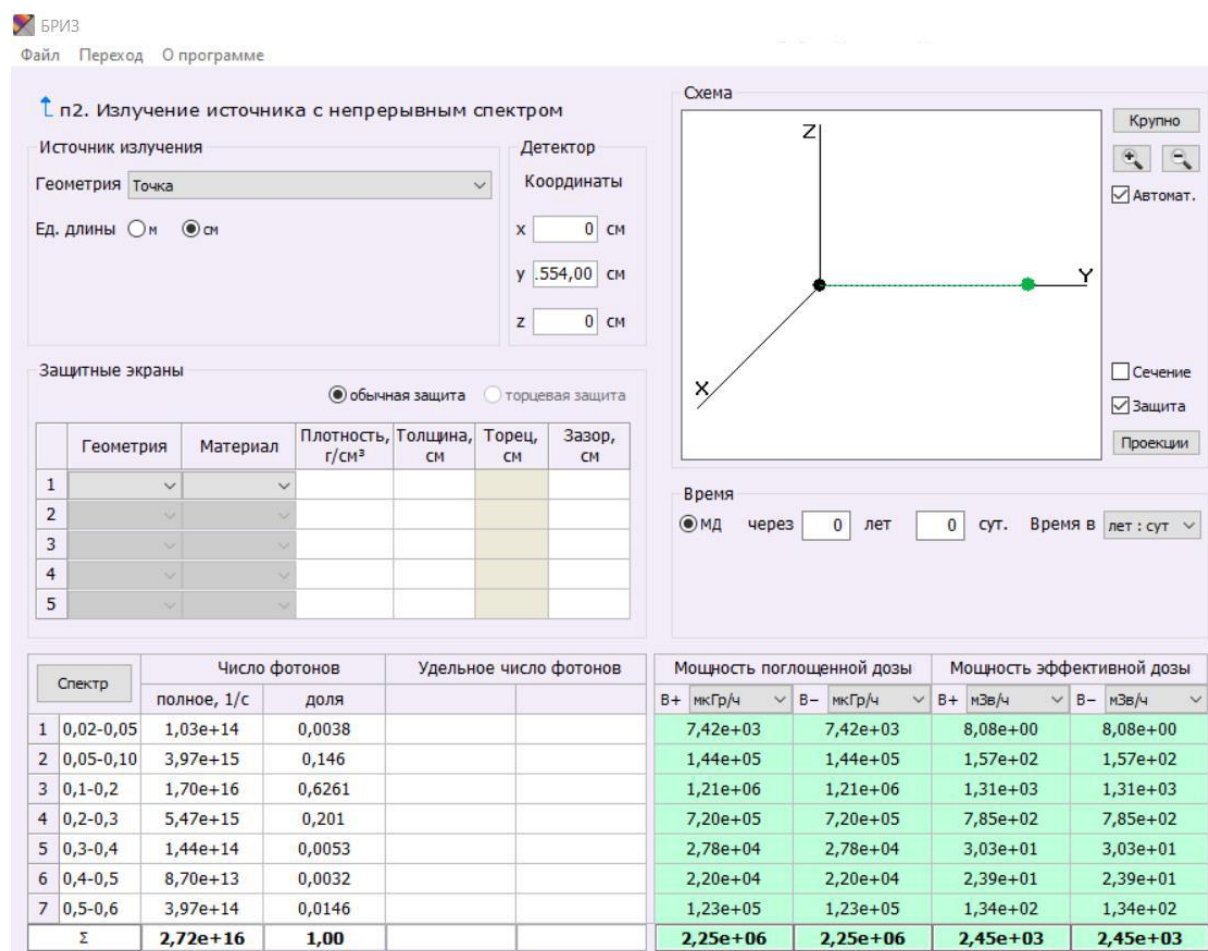


Рисунок 6.1– Расчет без радиационной защиты для спектра отраженных фотонов с граничной энергией ($E_{гр} = 10$ МэВ)

6.2. Расчет толщины защиты для спектра отраженных фотонов от бетона с учетом категории помещений.

6.2.1. Определение толщины защиты для спектра отраженных фотонов с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ в обратном направлении относительно пучка электронов ($\Theta = 180^\circ$).

Спектр отраженных фотонов от бетона, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло, с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ приведены в табл. П1.1 приложения 1.

Основные исходные данные для расчета:



Рис.6.2.1- Зависимость числа фотонов от группового разбиения по энергии фотонов источника, $E_{гр} = 10$ МВ.

Энергия ускорителя – $E_0 = 10$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 1,2$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 15,54$ м.

Мощность поглощенной дозы $D_{п}$ по программе БРИЗ $D_{п} = 2.25E+06$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя:

$$D_{\text{пр}} = \frac{10^{-3} \cdot \text{ПД}}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем необходимую кратность ослабления $k=1.88\text{E}+06$

Толщина защиты, рассчитанная по разработанной программе, составляет:

$$d_3 = 79.7 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 67 \text{ см.}$$

Таблица 6.2.1

Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл		
		полное, 1/с	доля			В+	мкГр/ч	▼
1	0,02-0,05	1,03e+14	0,0038				1,60e-70	
2	0,05-0,10	3,97e+15	0,146				8,82e-13	
3	0,1-0,2	1,70e+16	0,6261				5,62e-04	
4	0,2-0,3	5,47e+15	0,201				3,74e-02	
5	0,3-0,4	1,44e+14	0,0053				1,74e-02	
6	0,4-0,5	8,70e+13	0,0032				6,48e-02	
7	0,5-0,6	3,97e+14	0,0146				1,08e+00	
Σ		2,72e+16	1,00				1,20e+00	

На рис.5.2.3а-5.2.3б `показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника в бетоне отраженной компоненты тормозного излучения для спектров с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МВ.

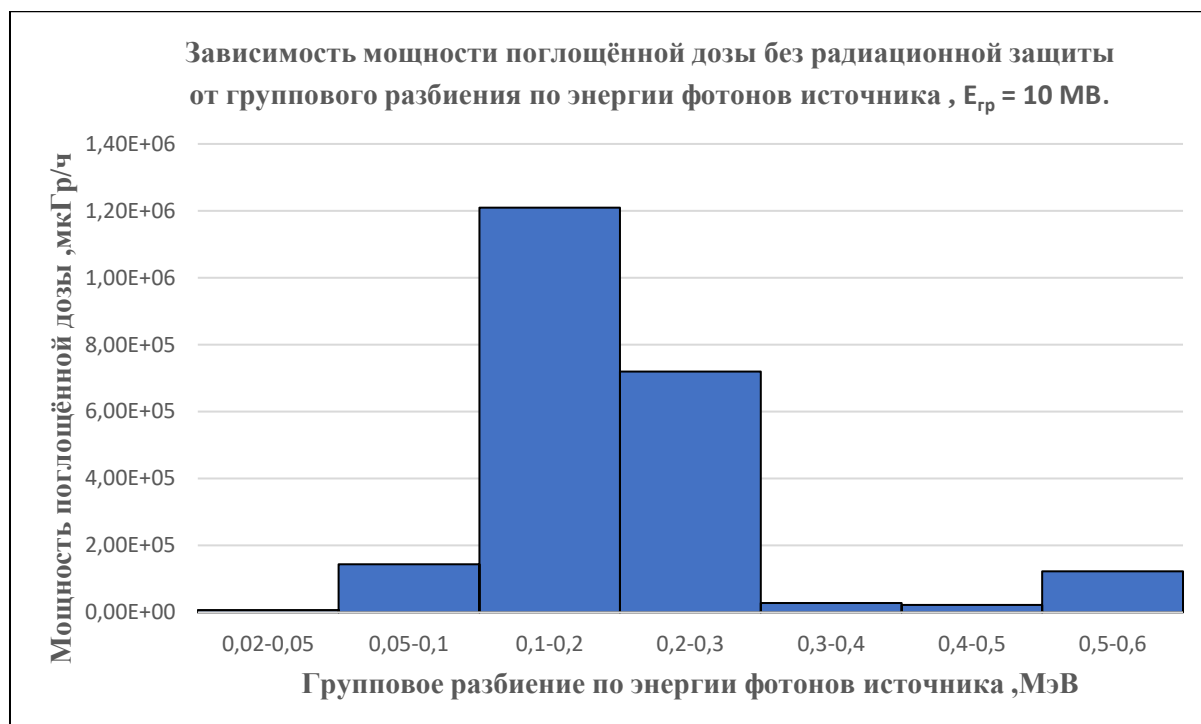


Рис.6.2.3а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты по групповой разбиении по энергии фотонов источника

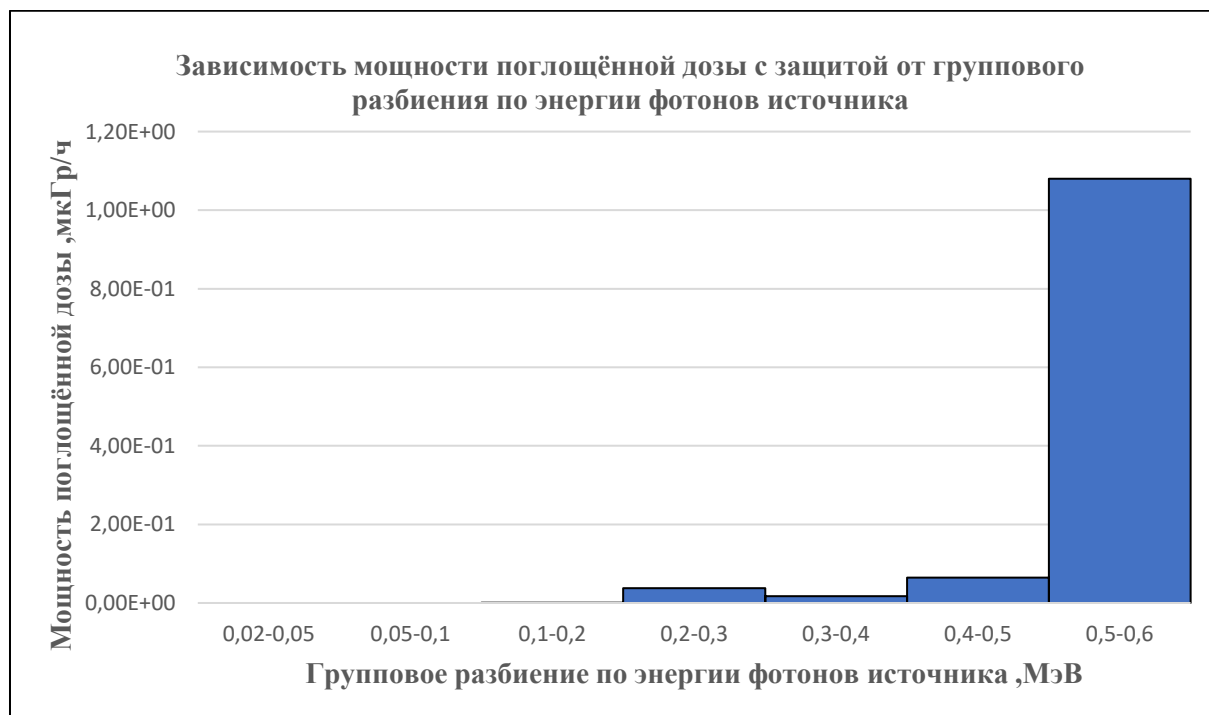


Рис.6.2.3б- Мощности поглощённой дозы с защитой по групповой разбиении по энергии фотонов источника

6.2.2 Расчет защиты для спектра отраженных фотонов с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МэВ в обратном направлении относительно пучка электронов ($\Theta = 180^\circ$).

Спектр отраженных фотонов от бетона, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло, с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МэВ приведены в табл.П1.1 приложения 1.

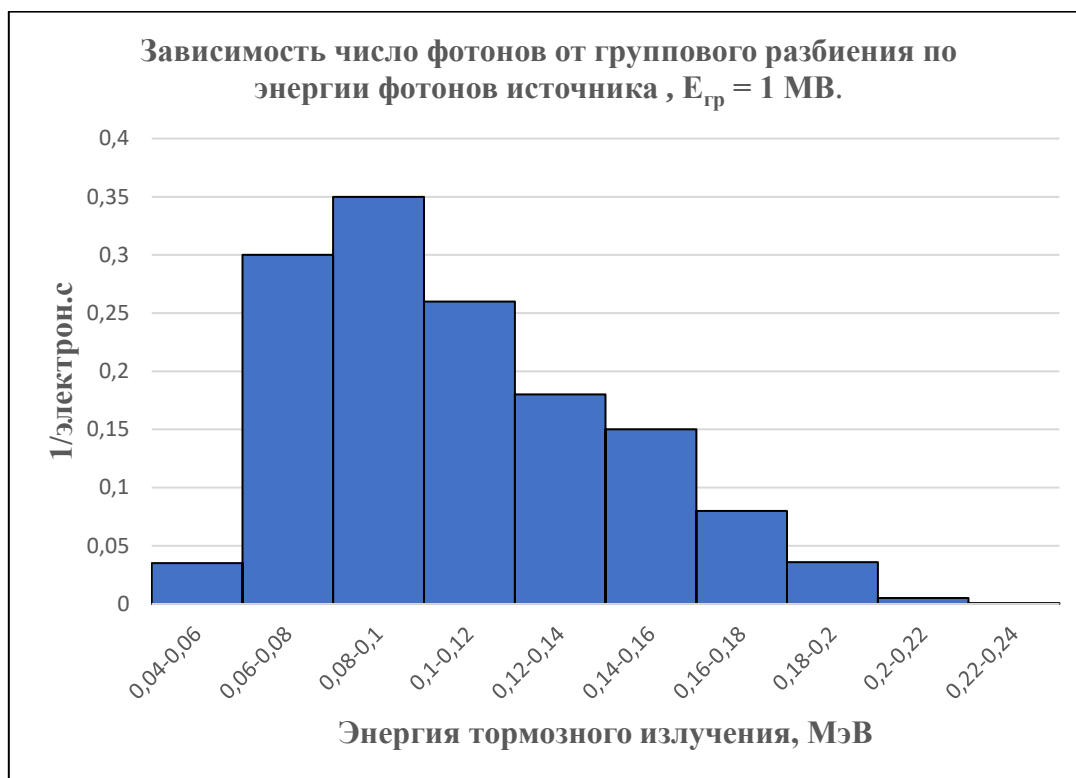


Рис.6.2.4- Зависимость числа фотонов от группового разбиения по энергии фотонов источника , $E_{гр} = 1$ МВ.

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 1$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 70$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 6,54$ м;

Мощность поглощенной дозы $D_{п}$ по программе БРИЗ $D_{п} = 9.70E+06$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя

$$D_{пр} = \frac{10^{-3} \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления:

$k = 8.08E+06$

Толщина защиты, рассчитанная по разработанной программе Монте-Карло, составляет:

$$d_3 = 42 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 61.65 \text{ см.}$$

Таблица 6.2.2

Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность поглощённой дозы	
		полное, 1/с	доля			В+ мкГр/ч	▼
1	0,02-0,05	3,59e+14	0,0125			2,06e-52	
2	0,05-0,10	1,37e+16	0,4779			2,75e-07	
3	0,1-0,2	1,45e+16	0,5054			7,63e-01	
4	0,2-0,3	1,21e+14	0,0042			4,32e-01	
Σ		2,87e+16	1,00			1,20e+00	

На рис.6.2.5а-6.2.5б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника в бетоне отраженной компоненты тормозного излучения для спектров с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МВ.

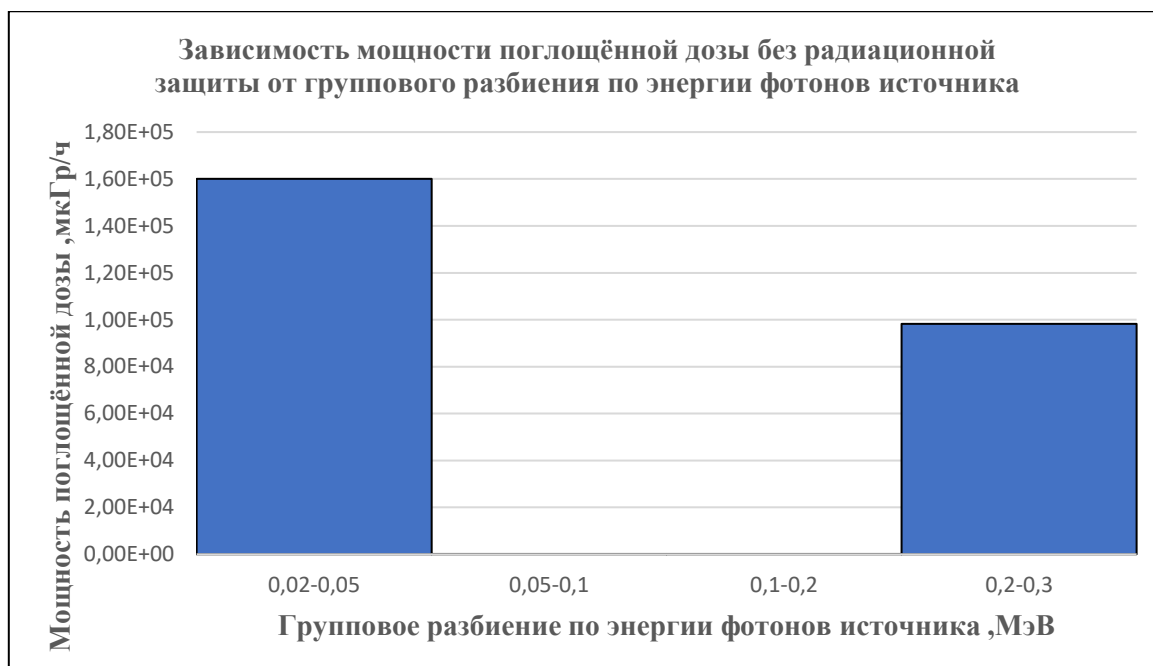


Рис.6.2.5а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

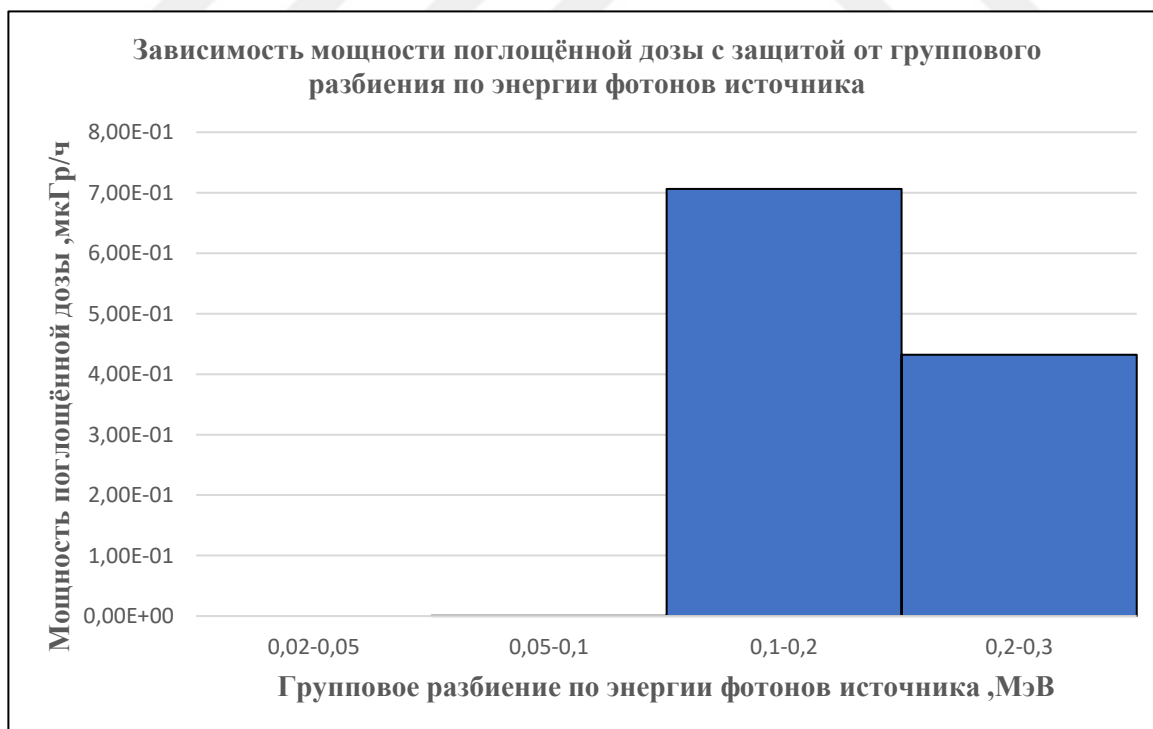


Рис.6.2.5а- Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

6.2.3 Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями

В таблице 5.2.3 значительная разница результатов оценки толщин защиты обусловлена существенным различием в применении эффективной энергии спектра и учёта спектрального состава излучения в различных методиках расчётов.

Таблица.5.2.3

$E_{гр}$	R, м	$D_{п}$, мкГр/ч	k	Расчёт	БРИЗ
1	6,25	9.70E+06	8.08E+06	42	61.65
10	15,54	2.25E+06	1.88E+06	67	79.7

7. Расчет толщины защиты для тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней

Замечания по спектрам тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней оптимальной толщины при нормальном падении тонких пучков электронов с энергиями $E_0 = 1, 10$ МэВ. Оптимальная толщина мишени - $\approx 0.5 \cdot \bar{R}_0$ ($\bar{R}_0$ – средний пробег электронов с начальной энергией пучка E_0).

Числовые спектры для каждой энергии электронов в конусах с различными углами растворов (напр., M1S5.dat, - угол раствора равен 5градусов, для энергии электронов 1 МэВ). Размерности спектров – 1/(МэВ·электрон).

7.1. Определение толщины защиты для спектра тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 1$ МэВ, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней

Спектр отраженных фотонов от бетона, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло, с граничной энергией $E_{гр} = 1$ МэВ приведен в рис.7.1.

Преобразование энергетического разбиения спектра тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней (M1S5) приведено в табл.П2.4 приложение 2.

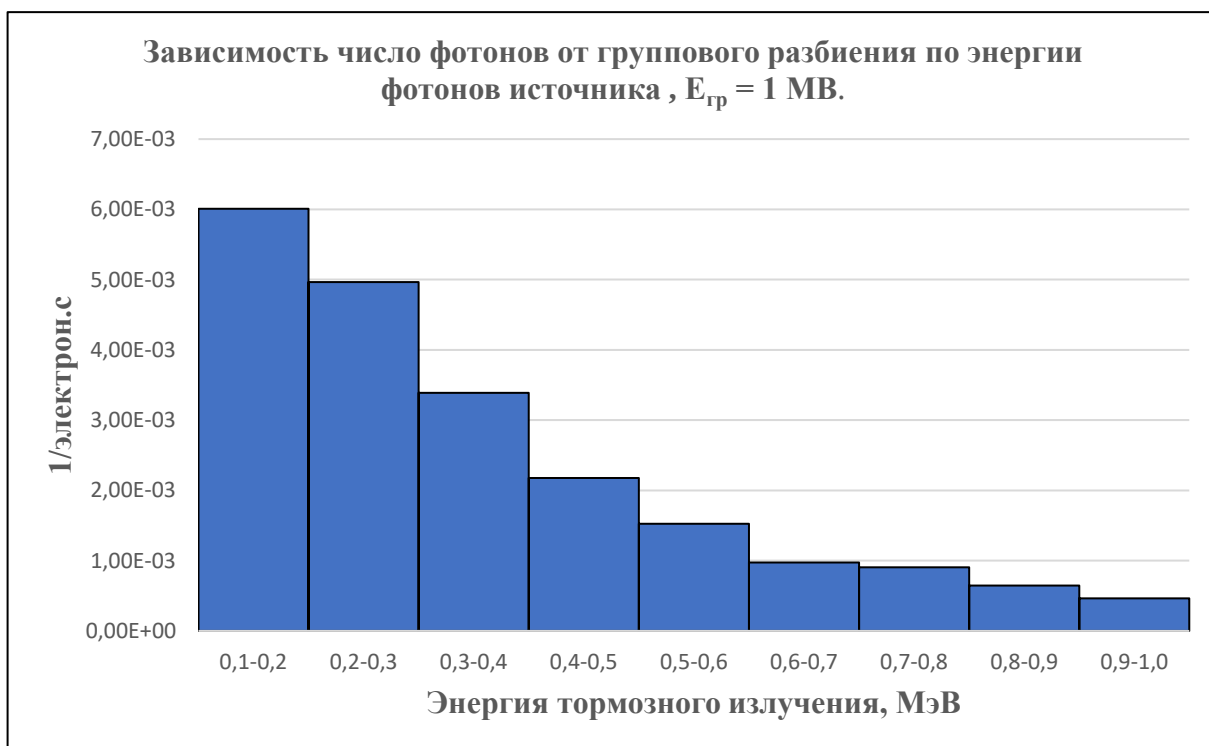


Рис 7.1- Зависимость числа фотонов от группового разбиения по энергии фотонов источника, $E_{гр} = 1$ МВ. (M1S5)

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 1$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 70$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 3,125$ м;

Мощность поглощенной дозы D_n по программе БРИЗ $D_n = 3,12E+09$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя

$$D_{пр} = \frac{10^{-3} \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления:

$$k = 2.60E+06$$

Для эффективной энергии тормозного излучения **0,67 МэВ** определяется толщина d_3 защитного барьера из бетона:

$$d_3 = 158 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 153 \text{ см.}$$

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл		
		полное, 1/с	доля			В+	мкГр/ч	▼
1	0,1-0,2	1,92e+17	0,29				1,10e-11	
2	0,2-0,3	1,59e+17	0,24				1,90e-07	
3	0,3-0,4	1,06e+17	0,16				3,09e-05	
4	0,4-0,5	6,62e+16	0,10				6,26e-04	
5	0,5-0,6	4,63e+16	0,07				5,47e-03	
6	0,6-0,7	3,31e+16	0,05				2,40e-02	
7	0,7-0,8	2,65e+16	0,04				1,13e-01	
8	0,8-0,9	1,99e+16	0,03				3,21e-01	
9	0,9-1,0	1,32e+16	0,02				7,38e-01	
Σ		6,62e+17	1,00				1,20e+00	

Таблица 7.1- Мощности поглощённой дозы с защитой по групповой разбивки по энергии фотонов источника

На рис.7.1а-7.1б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника тормозного излучения для спектров с граничным энергией $E_{гр} = 1$ МВ.

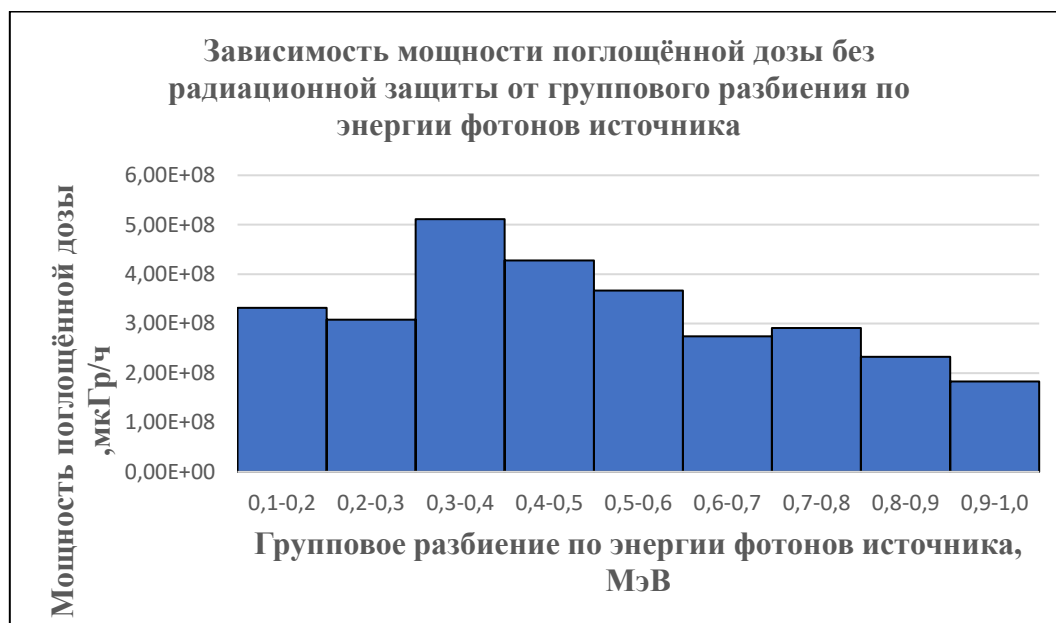


Рис.7.1а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

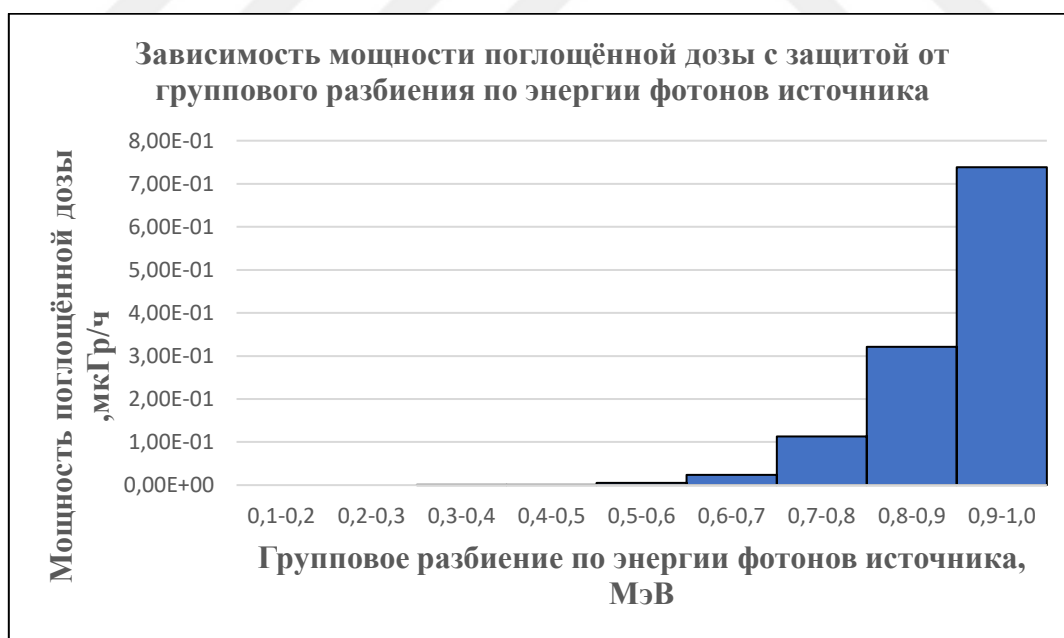


Рис.7.1б- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

7.2.Определение толщины защиты для спектра тормозного излучения с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ ,выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней

Спектр отраженных фотонов от бетона, который рассчитан Смирновым В.В. методом Монте-Карло, с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МэВ приведены в рис.7.2.

Преобразование энергетического разбиения спектра тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней(M10S5) приведено в табл.П2.2 приложение 2.

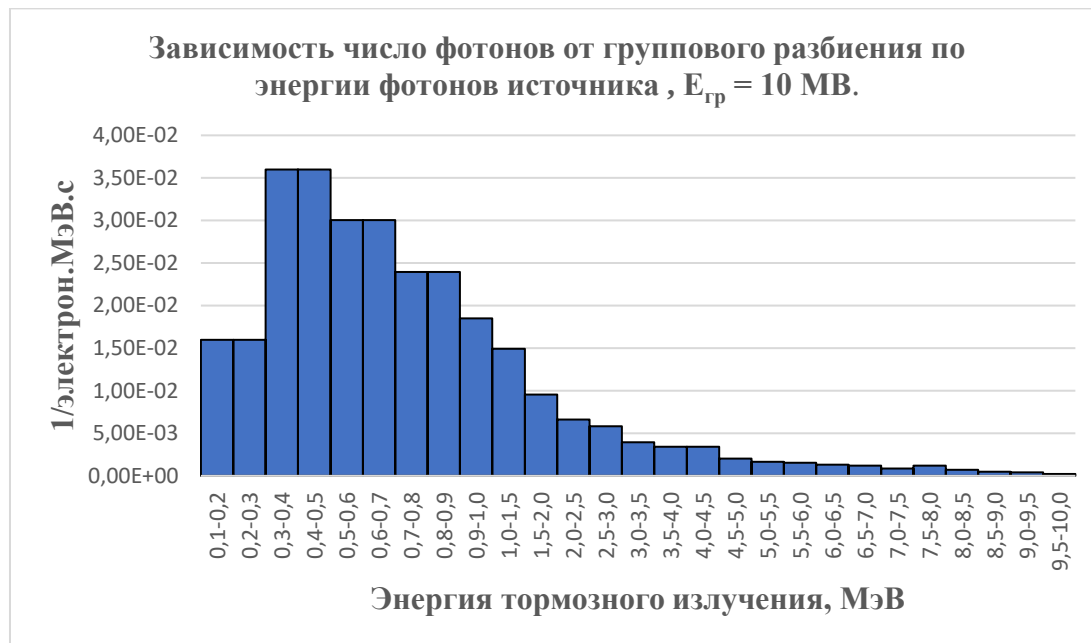


Рис 7.2- Зависимость число фотонов от группового разбиения по энергии фотонов источника , $E_{гр} = 10$ МВ. (M10S5)

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 10$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 1,2$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 7,77$ м.

Мощность поглощенной дозы $D_{п}$ по программе БРИЗ $D_{п} = 8.57E+07$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя:

$$D_{\text{пр}} = \frac{10^{-3} \cdot \text{ПД}}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления $k=7.14\text{E}+07$

Для эффективной энергии тормозного излучения **5 МэВ** определяется толщина d_3 защитного барьера из бетона:

$$d_3 = 311 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 309 \text{ см.}$$



Таблица 7.2

Мощности поглощённой дозы с защитой по групповой разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл		
		полное, 1/с	доля			В+	мкГр/ч	✓
1	0,1-0,2	8,52e+14	0,03				3,12e-37	
2	0,2-0,3	8,52e+14	0,03				9,79e-29	
3	0,3-0,4	1,99e+15	0,07				1,65e-23	
4	0,4-0,5	1,99e+15	0,07				2,29e-20	
5	0,5-0,6	1,70e+15	0,06				3,96e-18	
6	0,6-0,7	1,70e+15	0,06				2,26e-16	
7	0,7-0,8	1,42e+15	0,05				5,72e-15	
8	0,8-0,9	1,42e+15	0,05				1,05e-13	
9	0,9-1,0	1,14e+15	0,04				9,68e-13	
10	1,0-1,5	3,98e+15	0,14				6,66e-10	
11	1,5-2,0	2,56e+15	0,09				2,58e-07	
12	2,0-2,5	1,70e+15	0,06				8,10e-06	
13	2,5-3,0	1,70e+15	0,06				1,35e-04	
14	3,0-3,5	1,14e+15	0,04				7,99e-04	
15	3,5-4,0	8,52e+14	0,03				2,90e-03	
16	4,0-4,5	8,52e+14	0,03				1,05e-02	
17	4,5-5,0	5,68e+14	0,02				1,95e-02	
18	5,0-5,5	5,68e+14	0,02				4,57e-02	
19	5,5-6,0	2,84e+14	0,01				4,54e-02	
20	6,0-6,5	2,84e+14	0,01				7,92e-02	
21	6,5-7,0	2,84e+14	0,01				1,22e-01	
22	7,0-7,5	2,84e+14	0,01				1,88e-01	
23	7,5-8,0	2,84e+14	0,01				2,84e-01	
24	8,0-8,5	2,84e+14	0,01				3,96e-01	
25	8,5-9,0	0	0				0	
26	9,0-9,5	0	0				0	
27	9,5-10	0	0				0	
Σ		2,84e+16	1,00				1,20e+00	

На рис.7.2а-7.2б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника ормозного излучения для спектров с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МВ.

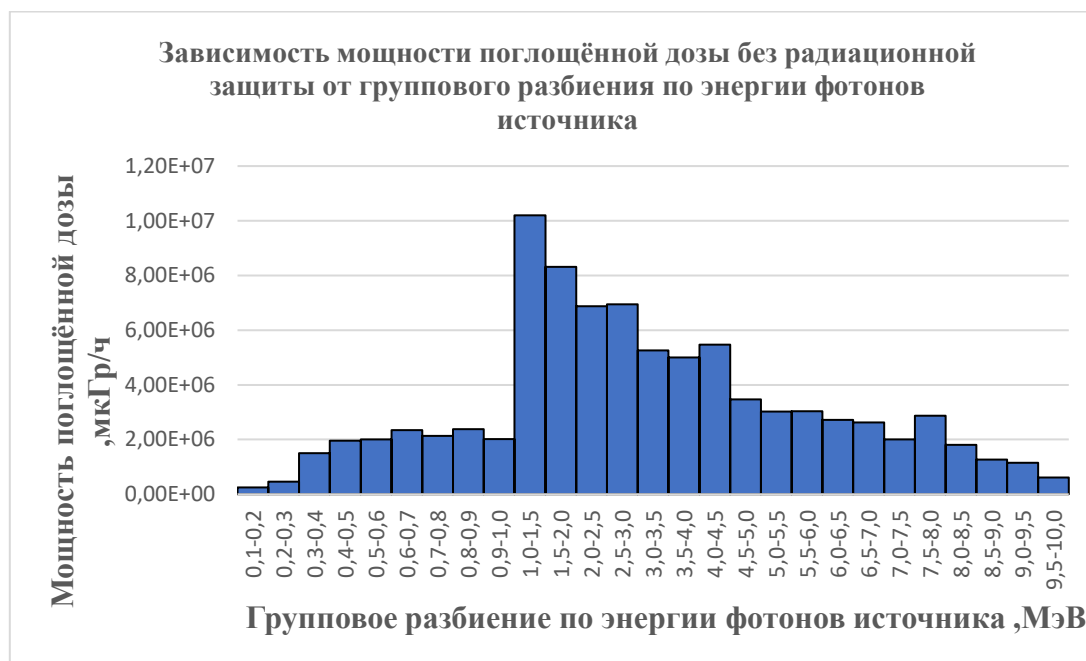


Рис.7.2а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника



Рис.7.2б- Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении фотонов источника

7.3 Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями

По предложенным двумя методам были рассчитаны толщины защиты от первичного тормозного излучения. Полученные результаты расчетов представлены в табл.7.3

Таблица.7.3

	Д _п , мкГр	k	СанПин	БРИЗ
E _{гр} = 1 МэВ	3,12E+09	2.60E+06	158	153
E _{гр} = 10 МэВ	8.57E+07	7.14E+07	311	309

8.Расчет защиты для спектра фотонов тормозного излучения, выходящего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.

8.1.Спектр фотонов тормозного излучения, выходящего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.

Пучок электронов в виде дискового мононаправленного моноэнергетического источника электронов с энергией E_e диаметром $d_0=1,0$ мм падает на диаметральную поверхность сферической вольфрамовой мишени (плотность вольфрама – 19,3 г/см³) оптимального радиуса R .

Расчеты энергетических распределений плотности потока и тока фотонов тормозного излучения, выходящего под разными углами относительно направления падающего пучка электронов, на расстоянии 1 м от центра вольфрамовой мишени, выполнялись методом Монте-Карло по программе MCNP-4c2 [3] на основе оценки по пересечениям и локальной оценки потока. Все расчетные результаты нормированы на 1 электрон, падающий на поверхность мишени. [11]

Энергетические распределения плотности потока фотонов тормозного излучения на расстоянии 1 м от вольфрамовой мишени в точках, расположенных под разными углами относительно направления падающего пучка электронов θ , град: 0 – 1; 90 – 2; 180 – 3 при облучении ее электронами с энергией 10

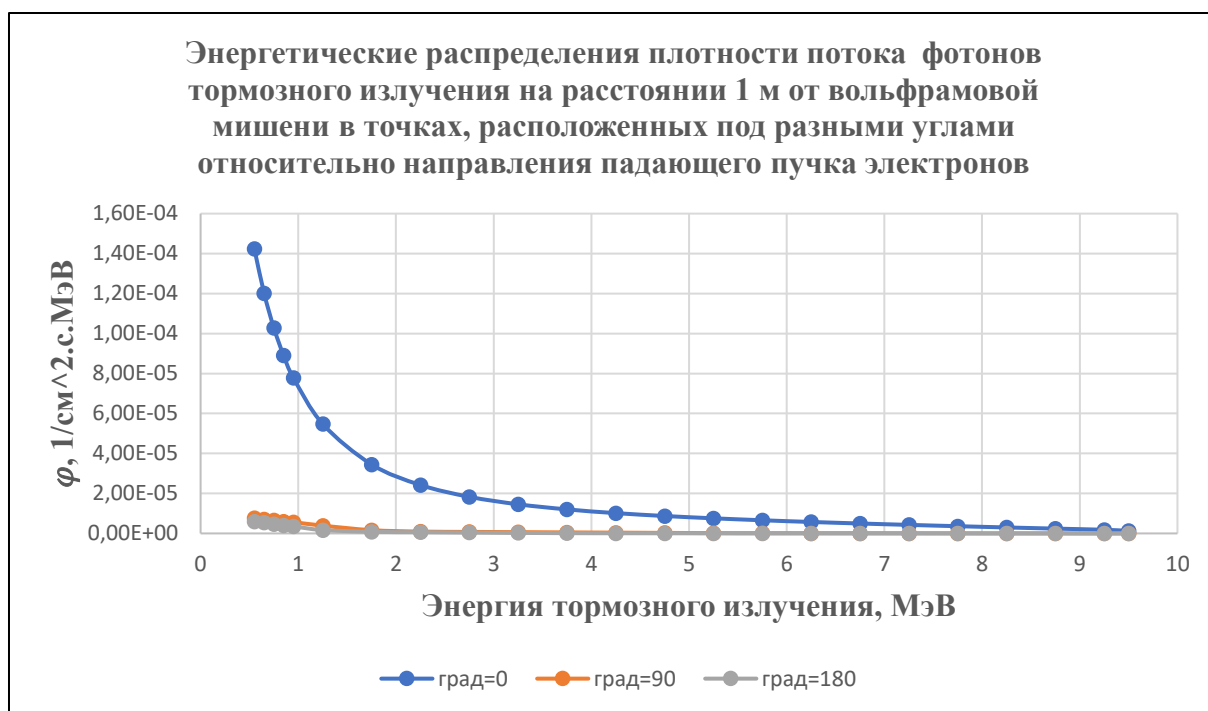
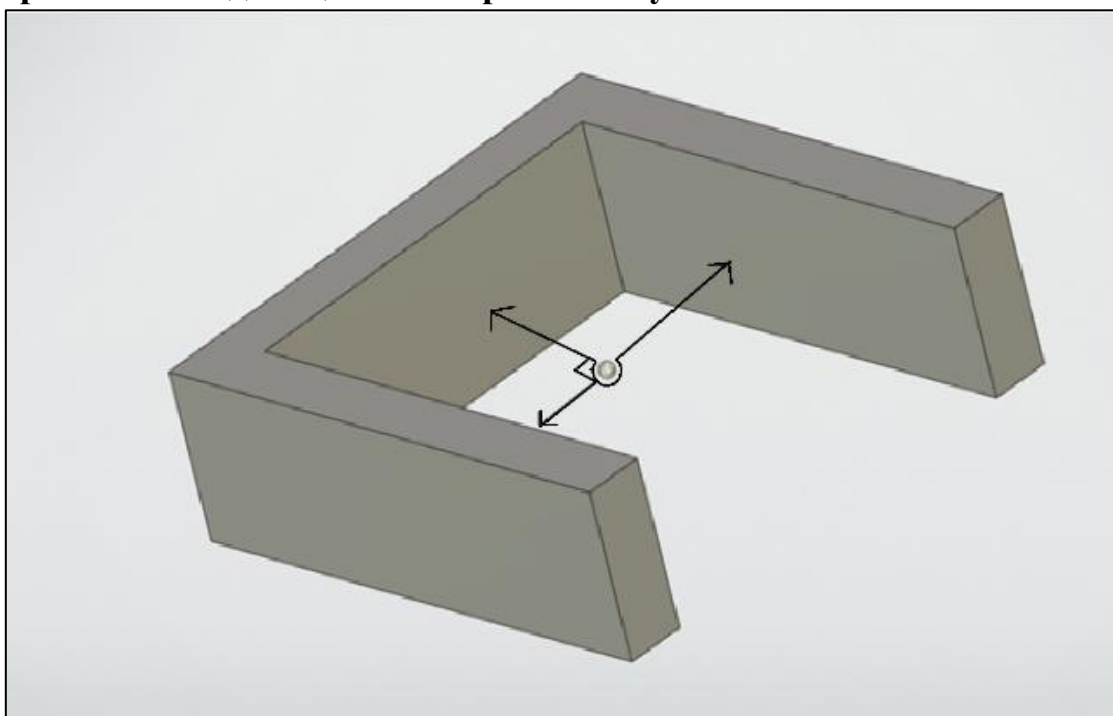


Рис 8.1- Энергетические распределения плотности потока фотонов тормозного излучения

8.2.Расчет толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения, вылетающего под разными углами относительно направления падающего электронного пучка.



8.2.1.Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=0^\circ$)

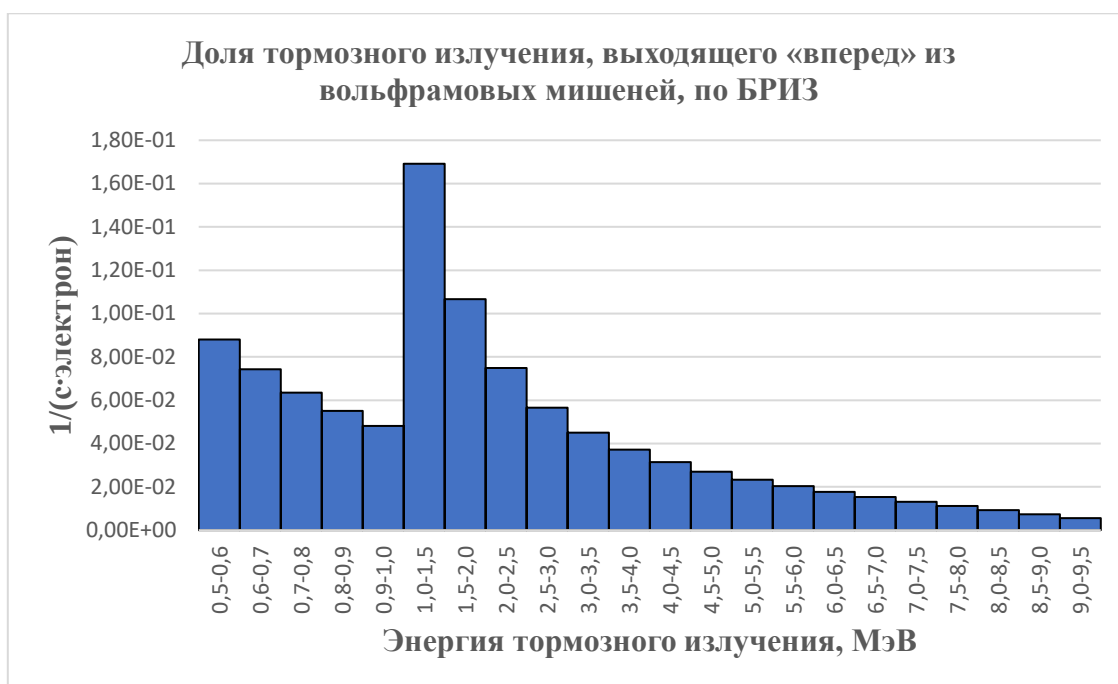


Рис.8.2.1- Доля тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней, по БРИЗ

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 10$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 1,2$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 7,77$ м.

Мощность поглощенной дозы D_n по программе БРИЗ $D_n = 1.35E+03$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя:

$$D_{пр} = \frac{10^{-3} \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления $k=1.13E+03$

Для эффективной энергии тормозного излучения **5 МэВ** определяется толщина d_3 защитного барьера из бетона:

$$d_3 = 135 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 121 \text{ см.}$$

Таблица 8.2.1

Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл	
		полное, 1/с	доля	1/с*см²	▼	В+	мкГр/ч ▼
1	0,5-0,6	3,24e+10	0,09	1,32e+11			2,15e-07
2	0,6-0,7	2,52e+10	0,07	1,02e+11			7,63e-07
3	0,7-0,8	2,16e+10	0,06	8,77e+10			2,31e-06
4	0,8-0,9	2,16e+10	0,06	8,77e+10			6,80e-06
5	0,9-1,0	1,80e+10	0,05	7,31e+10			1,41e-05
6	1,0-1,5	6,12e+10	0,17	2,48e+11			3,45e-04
7	1,5-2,0	3,96e+10	0,11	1,61e+11			2,40e-03
8	2,0-2,5	2,52e+10	0,07	1,02e+11			6,52e-03
9	2,5-3,0	2,16e+10	0,06	8,77e+10			1,59e-02
10	3,0-3,5	1,80e+10	0,05	7,31e+10			2,97e-02
11	3,5-4,0	1,44e+10	0,04	5,85e+10			4,28e-02
12	4,0-4,5	1,08e+10	0,03	4,38e+10			5,22e-02
13	4,5-5,0	1,08e+10	0,03	4,38e+10			7,78e-02
14	5,0-5,5	7,20e+09	0,02	2,92e+10			7,20e-02
15	5,5-6,0	7,20e+09	0,02	2,92e+10			9,40e-02
16	6,0-6,5	7,20e+09	0,02	2,92e+10			1,17e-01
17	6,5-7,0	7,20e+09	0,02	2,92e+10			1,39e-01
18	7,0-7,5	3,60e+09	0,01	1,46e+10			8,21e-02
19	7,5-8,0	3,60e+09	0,01	1,46e+10			9,65e-02
20	8,0-8,5	3,60e+09	0,01	1,46e+10			1,10e-01
21	8,5-9,0	3,60e+09	0,01	1,46e+10			1,23e-01
22	9,0-9,5	3,60e+09	0,01	1,46e+10			1,36e-01
Σ		3,60e+11	1,00	1,46e+12			1,20e+00

На рис.8.2.1а-8.2.1б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника тормозного излучения для спектров с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МВ.



Рис.8.2.1а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

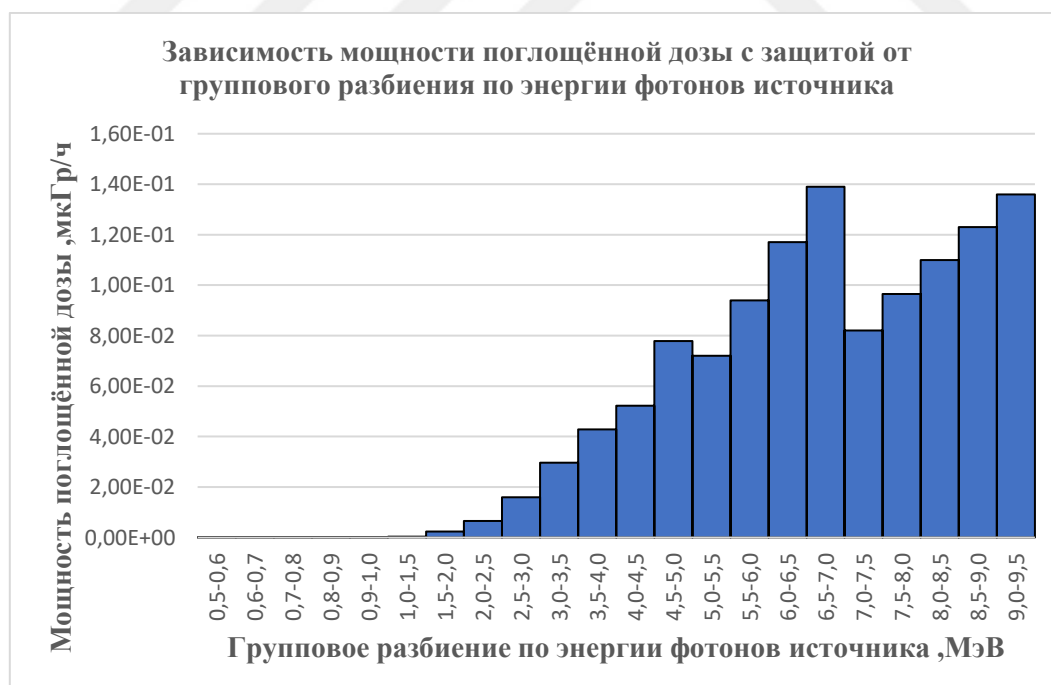


Рис.8.2.1б- Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

8.2.2.Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=90^\circ$)

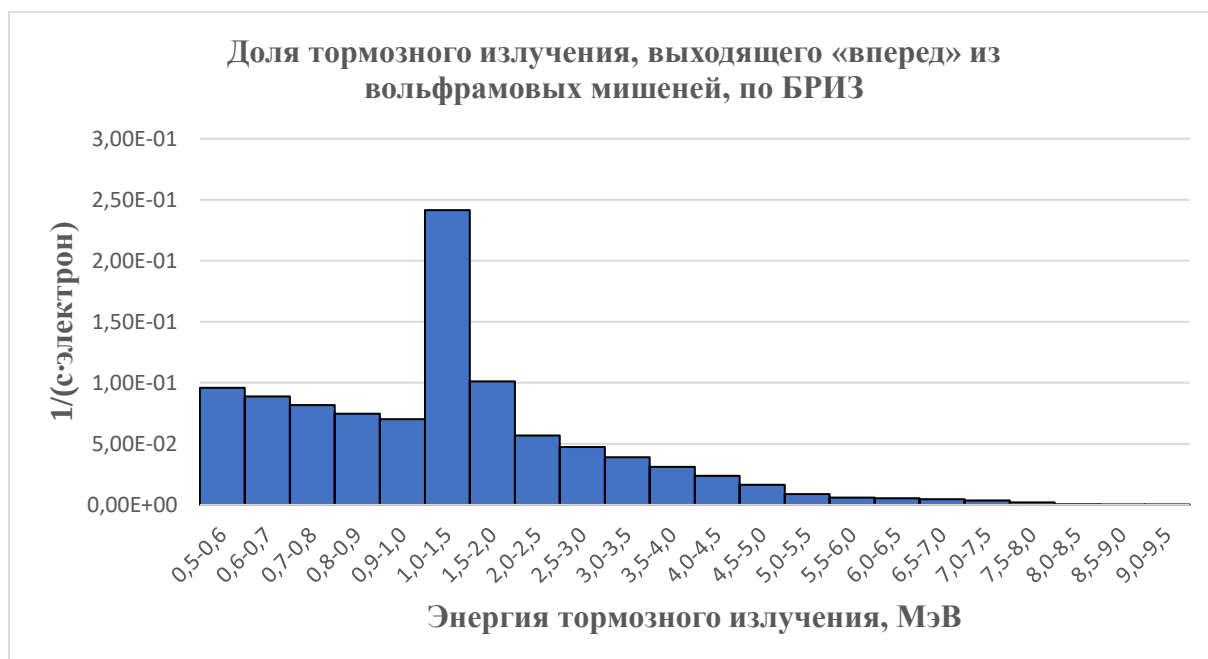


Рис 8.2.2- Доля тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней, по БРИЗ

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 10$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 1,2$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 7,77$ м.

Мощность поглощенной дозы D_n по программе БРИЗ $D_n = 4.28E+01$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя:

$$D_{пр} = \frac{10^{-3} \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления

$k=3.57E+01$

Для эффективной энергии тормозного излучения **5 МэВ** определяется толщина d_3 защитного барьера из бетона:

$$d_3 = 60 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 53 \text{ см.}$$

Таблица 8.2.2

Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл	
		полное, 1/с	доля	1/с*см ²		В+	мкГр/ч
1	0,5-0,6	1,42e+09	0,0958	5,76e+09			1,57e-03
2	0,6-0,7	1,31e+09	0,0888	5,34e+09			2,78e-03
3	0,7-0,8	1,21e+09	0,0818	4,92e+09			4,46e-03
4	0,8-0,9	1,11e+09	0,0748	4,49e+09			6,48e-03
5	0,9-1,0	1,04e+09	0,0701	4,21e+09			8,93e-03
6	1,0-1,5	3,57e+09	0,2414	1,45e+10			7,13e-02
7	1,5-2,0	1,50e+09	0,1012	6,08e+09			8,21e-02
8	2,0-2,5	8,42e+08	0,0569	3,42e+09			8,71e-02
9	2,5-3,0	7,03e+08	0,0475	2,85e+09			1,14e-01
10	3,0-3,5	5,76e+08	0,0389	2,34e+09			1,33e-01
11	3,5-4,0	4,62e+08	0,0312	1,87e+09			1,38e-01
12	4,0-4,5	3,52e+08	0,0238	1,43e+09			1,31e-01
13	4,5-5,0	2,43e+08	0,0164	9,85e+08			1,09e-01
14	5,0-5,5	1,33e+08	0,009	5,41e+08			7,02e-02
15	5,5-6,0	8,58e+07	0,0058	3,49e+08			5,15e-02
16	6,0-6,5	8,14e+07	0,0055	3,30e+08			5,44e-02
17	6,5-7,0	6,96e+07	0,0047	2,82e+08			5,08e-02
18	7,0-7,5	5,48e+07	0,0037	2,22e+08			4,36e-02
19	7,5-8,0	2,96e+07	0,002	1,20e+08			2,55e-02
20	8,0-8,5	8,88e+06	0,0006	3,61e+07			8,21e-03
21	8,5-9,0	4,44e+06	0,0003	1,80e+07			4,39e-03
Σ		1,48e+10	1,00	6,01e+10			1,20e+00

На рис.8.2.2а-8.2.2б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой из бетона при групповом разбиении по энергии фотонов источника тормозного излучения для спектра с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МВ.



Рис.8.2.2а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

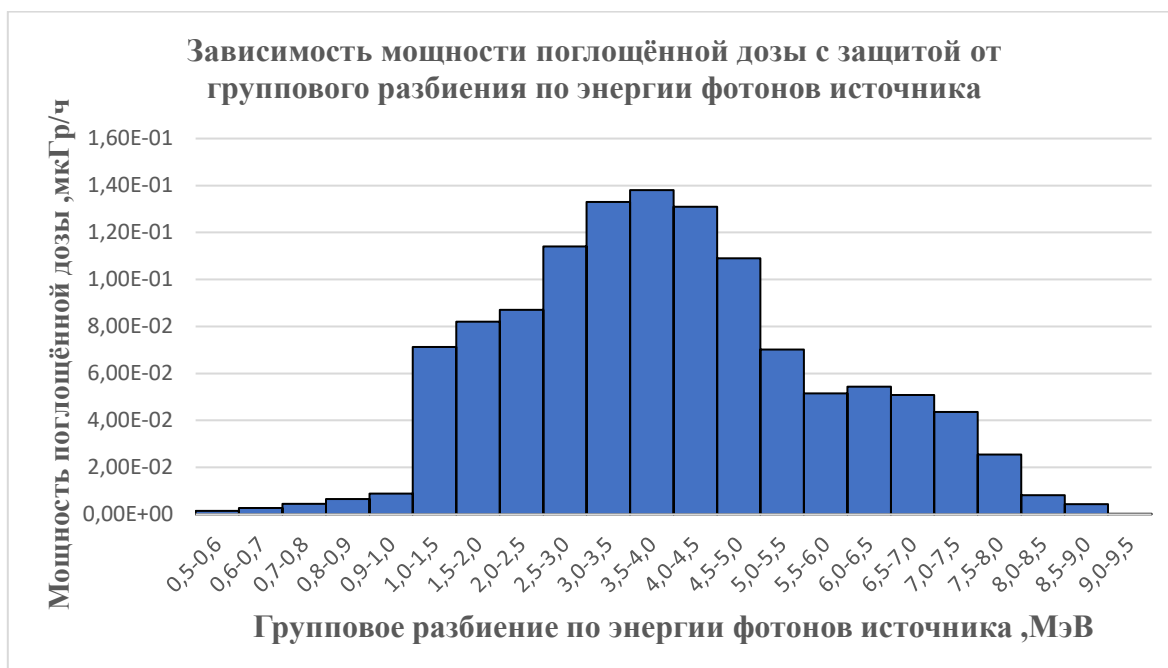


Рис.8.2.2б- Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

8.2.3. Определение толщины защиты для спектра фотонов тормозного излучения с граничной энергией $E_{гр} = 10$ МэВ под углом ($\theta=180^\circ$)



Рис 8.2.3- Доля тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней, по БРИЗ

Основные исходные данные для расчета:

Энергия ускорителя – $E_0 = 10$ МэВ;

Средний ток ускорителя $I = 1,2$ мА;

Расстояние от мишени до точки контроля составляет $R = 7,77$ м.

Мощность поглощенной дозы D_n по программе БРИЗ $D_n = 2.08E+01$ мкГр/ч

Проектную мощность дозы для территория, прилегающая к наружным стенам здания ускорителя:

$$D_{пр} = \frac{10^{-3} \cdot ПД}{2 \cdot T \cdot n \cdot 1700} = \frac{10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 1700} = 1,2 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}}$$

По формуле (3) вычисляем соответствующую необходимую кратность ослабления $k=1.73E+01$

Для эффективной энергии тормозного излучения **5 МэВ** определяется толщина d_3 защитного барьера из бетона:

$$d_3 = 46 \text{ см.}$$

Толщина защиты, рассчитанная по программе Бриз, составляет:

$$d_3 = 40 \text{ см.}$$

Таблица 8.2.3

Мощности поглощённой дозы с защитой по групповой разбиении по энергии фотонов источника

Спектр		Число фотонов		Удельное число фотонов		Мощность погл	
		полное, 1/с	доля	1/с*см²		B+	мкГр/ч
1	0,5-0,6	1,11e+09	0,1347	4,49e+09			1,04e-02
2	0,6-0,7	9,91e+08	0,1207	4,02e+09			1,55e-02
3	0,7-0,8	8,53e+08	0,1039	3,46e+09			2,02e-02
4	0,8-0,9	7,37e+08	0,0898	2,99e+09			2,48e-02
5	0,9-1,0	6,45e+08	0,0786	2,62e+09			2,90e-02
6	1,0-1,5	1,56e+09	0,1895	6,32e+09			1,34e-01
7	1,5-2,0	7,43e+08	0,0905	3,02e+09			1,38e-01
8	2,0-2,5	5,59e+08	0,0681	2,27e+09			1,68e-01
9	2,5-3,0	3,92e+08	0,0477	1,59e+09			1,67e-01
10	3,0-3,5	2,48e+08	0,0302	1,01e+09			1,39e-01
11	3,5-4,0	1,15e+08	0,014	4,67e+08			7,85e-02
12	4,0-4,5	7,96e+07	0,0097	3,23e+08			6,48e-02
13	4,5-5,0	6,32e+07	0,0077	2,57e+08			6,01e-02
14	5,0-5,5	4,68e+07	0,0057	1,90e+08			5,08e-02
15	5,5-6,0	3,20e+07	0,0039	1,30e+08			3,85e-02
16	6,0-6,5	2,63e+07	0,0032	1,07e+08			3,46e-02
17	6,5-7,0	9,03e+06	0,0011	3,67e+07			1,28e-02
18	7,0-7,5	6,57e+06	0,0008	2,67e+07			1,00e-02
19	7,5-8,0	1,64e+06	0,0002	6,67e+06			2,67e-03
20	8,0-8,5	0	0	0			0
21	8,5-9,0	0	0	0			0
22	9,0-9,5	0	0	0			0
Σ		8,21e+09	1,00	3,33e+10			1,20e+00

На рис.8.2.3а-8.2.3б показаны рассчитанные мощности поглощённой дозы без радиационной защиты и с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника тормозного излучения для спектра с граничным энергией $E_{гр} = 10$ МВ.

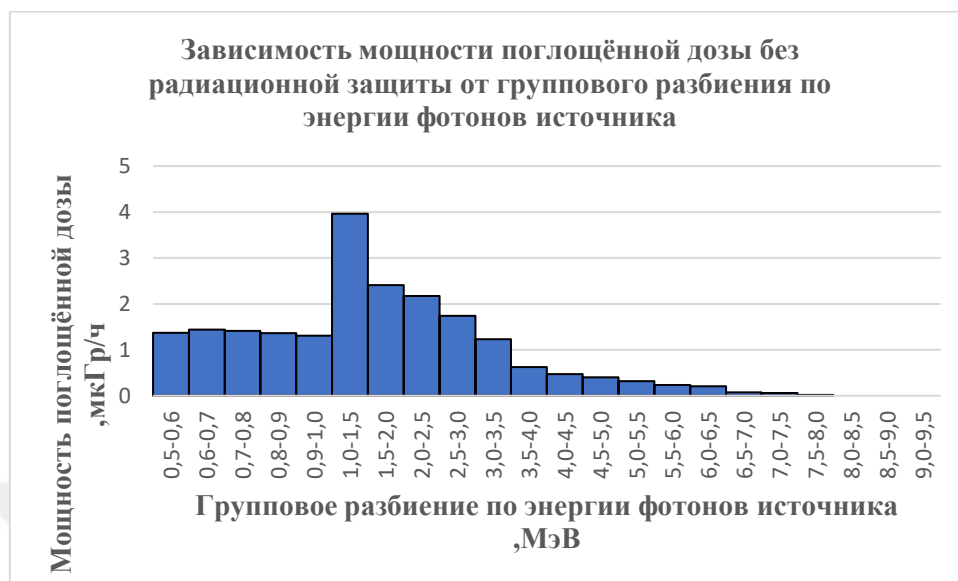


Рис.8.2.3а- Мощности поглощённой дозы без радиационной защиты при групповом разбиении по энергии фотонов источника

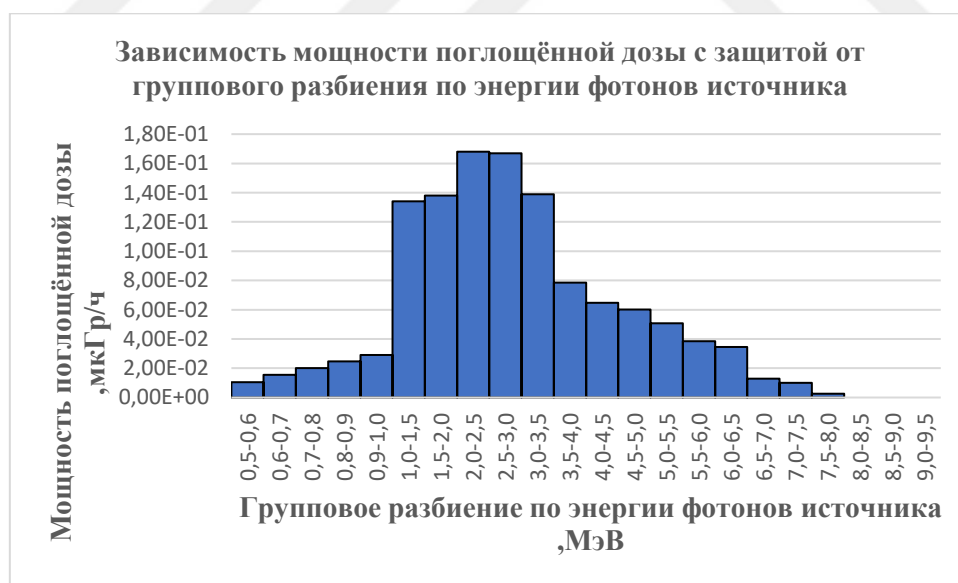


Рис.8.2.3б- Мощности поглощённой дозы с защитой при групповом разбиении по энергии фотонов источника

8.2.4 Сравнение результатов расчета защиты различными методами для ускорителей с различными граничными энергиями

По предложенным двумя методам были рассчитаны толщины защиты от первичного тормозного излучения. Полученные результаты расчетов представлены в табл.8.3

Таблица 8.3

	Дп, мкГр	k	СанПин	БРИЗ
Под углом 0°	1.35E+03	1.13E+03	135	121
Под углом 90°	4.28E+01	3.57E+01	60	53
Под углом 180°	2.08E+01	1.73E+01	46	40

По предложенным трем методам были рассчитаны толщины защиты от первичного тормозного излучения. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 8,3.

9.Сравнение результатов расчета защиты различными методами для спектров, рассчитанных различными авторами, с различными граничными энергиями

Таблица 9.1

Расчетные значения толщин (см) защиты от отраженных и первичных тормозных излучений, рассчитанные в программе «БРИЗ» и согласно СанПин2.6.1.2573, с граничными энергиями ($E_{гр} = 10$ МэВ)

E=10 МэВ	ОТРАЖЕННЫ Е	под углом 0°	под углом 90°	под углом 180°
	СМИРНОВ В.В.	САХАРОВ В.К.	САХАРОВ В.К.	САХАРОВ В.К.
СанПин		135	60	46
БРИЗ	79	121	53	40
РАСЧЕТ	67			

Таблица 9.2

Расчетные значения толщин (см) защиты от отраженных и первичных тормозных излучений, рассчитанные в программе «БРИЗ» и согласно СанПин2.6.1.2573, с граничными энергиями ($E_{гр} = 1 \text{ МэВ}$)

$E=1 \text{ МэВ}$	ОТРАЖЕННЫЕ	ВПЕРЕД ПОД УГЛОМ РАСТВОРА(M1S5)
СанПин		158
БРИЗ	62	153
РАСЧЕТ (Смирнов В.В.)	42	

По полученным данным можем сделать вывод о согласии трех методов расчета. Различие полученных данных толщин защиты не превышает 15 %.

Заключение

В данной работе произведен расчет биологической защиты стен и в ходе дипломной работы было выполнено следующее:

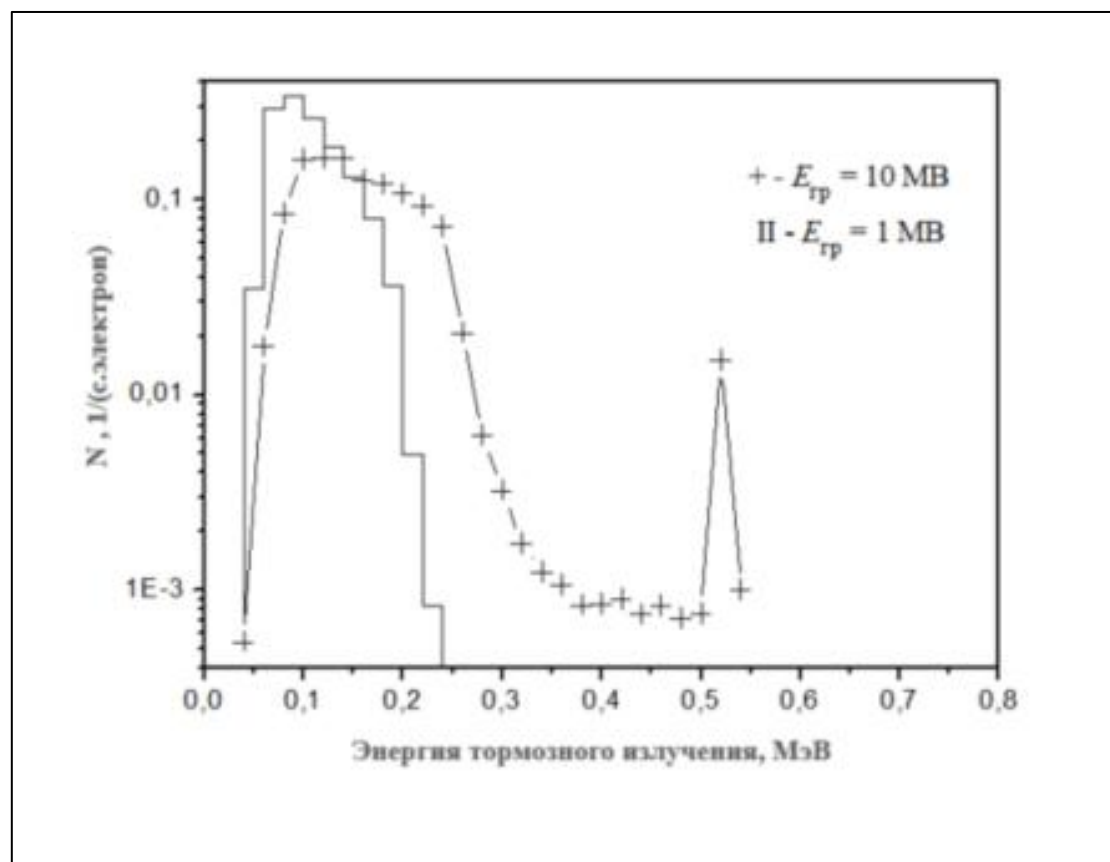
- Проведен анализ различных методов расчёта защиты ускорителей.
- Протестирован расчётный комплекс БРИЗ. Расчеты показали хорошее совпадение результатов расчетов по программе БРИЗ с расчетом по аналитической формуле.
- Проведен расчет мощностей доз в расчетных точках без радиационной защиты.
- Определены кратности ослабления с учетом категории помещений.
- Получены значения толщин защиты для x спектров тормозного излучения с граничной энергией 1 и 10 Мэв.
- Расчеты проведены для излучения, выходящего из мишени под углом $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$.
- Рассчитана защита от излучения рассеянного на уголь 180° от бетонного пола. В этом случае толщина защитного перекрытия рассчитывается более точно чем по СанПин.
- Полученные результаты хорошо согласуются другими методами расчета (СанПин, расчет по отраженному излучению)

Список использованной литературы

1. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. СанПин 2.6.1.2573-10. 2010г.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СанПиН 2.6.1.2523—09.
3. Черняев А.П. Ускорители в современном мире, 2012
4. Комочков Н.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
5. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. В 2-х т. Т. 2: Защита от излучений ядерно-технических установок: учеб. для вузов – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
6. Swanson W.P. Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, IAEA Techn. Report series No. 188. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1979.
7. Беспалов В.И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие / В.И. Беспалов; Томский политехнический университет. 4-е изд., расширенное / – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 508 с.
8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ–99/2010). СП 2.6.1.2612-10. Минздрав России 2010г.
9. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
10. Программный комплекс оперативного расчета характеристик полей фотонного излучения БРИЗ-2 / НИЯУ МИФИ – Москва, 2015. – 89 с.
11. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ, Т. 120, ВЫП. 4, АПРЕЛЬ 2016 УДК 621.039-78(075.8) СПЕКТРЫ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОТОНЕЙТРОНОВ ИЗ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЕЙ 5—90 МэВ Сахаров В.К. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)
12. MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-13709-M, 2000

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1.1



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П2.1

Спектр тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней(M10S5)

	$E(10^{-3})$, МэВ	$1/(MэВ \cdot \text{электрон})$
1	0,1	3,33E-03
2	0,3	2,53E-02
3	0,5	2,14E-02
4	0,7	1,73E-02
5	0,9	1,33E-02
6	1,1	1,04E-02
7	1,3	9,34E-03
8	1,5	7,40E-03
9	1,7	6,09E-03
10	1,9	6,10E-03
11	2,1	4,92E-03
12	2,3	3,46E-03
13	2,5	4,29E-03
14	2,7	4,06E-03
15	2,9	3,55E-03
16	3,1	2,40E-03
17	3,3	2,50E-03
18	3,5	2,64E-03
19	3,7	2,04E-03
20	3,9	2,21E-03
21	4,1	2,62E-03
22	4,3	2,20E-03
23	4,5	1,75E-03
24	4,7	1,24E-03
25	4,9	1,28E-03

26	5,1	6,79E-04
27	5,3	1,27E-03
28	5,5	1,43E-03
29	5,7	7,49E-04
30	5,9	1,06E-03
31	6,1	1,01E-03
32	6,3	6,90E-04
33	6,5	8,55E-04
34	6,7	7,84E-04
35	6,9	8,50E-04
36	7,1	4,28E-04
37	7,3	5,32E-04
38	7,5	7,86E-04
39	7,7	8,45E-04
40	7,9	7,97E-04
41	8,1	4,24E-04
42	8,3	4,75E-04
43	8,5	2,63E-04
44	8,7	4,23E-04
45	8,9	2,12E-04
46	9,1	2,65E-04
47	9,3	3,17E-04
48	9,5	2,12E-04
49	9,7	1,59E-04
50	9,9	1,58E-04

Таблица П2.2

Преобразование энергетического разбиения спектра тормозного излучения,
выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней(M10S5)

$E(10^{-3}), \text{МэВ}$	$N(E)$
0,1-0,2	1,60E-03
0,2-0,3	1,60E-03
0,3-0,4	3,60E-03
0,4-0,5	3,60E-03
0,5-0,6	3,01E-03
0,6-0,7	3,01E-03
0,7-0,8	2,40E-03
0,8-0,9	2,40E-03
0,9-1,0	1,85E-03
1,0-1,5	7,47E-03
1,5-2,0	4,77E-03
2,0-2,5	3,31E-03
2,5-3,0	2,91E-03
3,0-3,5	1,97E-03
3,5-4,0	1,71E-03
4,0-4,5	1,71E-03
4,5-5,0	1,01E-03
5,0-5,5	8,22E-04
5,5-6,0	7,73E-04
6,0-6,5	6,51E-04
6,5-7,0	5,98E-04
7,0-7,5	4,30E-04
7,5-8,0	5,91E-04
8,0-8,5	3,55E-04
8,5-9,0	2,35E-04
9,0-9,5	2,04E-04
9,5-10,0	1,06E-04

Таблица П2.3

Спектр тормозного излучения, выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней(M1S5)

	$E(1), \text{МэВ}$	$1/(\text{МэВ} \cdot \text{электрон})$			
1	0,01	0,00E+00	26	0,51	3,87E-03
2	0,03	0,00E+00	27	0,53	2,56E-03
3	0,05	0,00E+00	28	0,55	3,07E-03
4	0,07	0,00E+00	29	0,57	3,13E-03
5	0,09	0,00E+00	30	0,59	2,62E-03
6	0,11	1,00E-02	31	0,61	2,39E-03
7	0,13	1,21E-02	32	0,63	2,10E-03
8	0,15	1,27E-02	33	0,65	2,32E-03
9	0,17	1,25E-02	34	0,67	1,58E-03
10	0,19	1,28E-02	35	0,69	1,33E-03
11	0,21	1,31E-02	36	0,71	1,78E-03
12	0,23	9,97E-03	37	0,73	2,03E-03
13	0,25	8,73E-03	38	0,75	1,89E-03
14	0,27	9,15E-03	39	0,77	1,54E-03
15	0,29	8,72E-03	40	0,79	1,83E-03
16	0,31	7,79E-03	41	0,81	1,75E-03
17	0,33	6,56E-03	42	0,83	1,54E-03
18	0,35	7,03E-03	43	0,85	1,18E-03
19	0,37	6,66E-03	44	0,87	9,77E-04
20	0,39	5,83E-03	45	0,89	1,03E-03
21	0,41	5,01E-03	46	0,91	8,75E-04
22	0,43	4,95E-03	47	0,93	1,02E-03
23	0,45	5,04E-03	48	0,95	1,08E-03
24	0,47	3,15E-03	49	0,97	7,71E-04
25	0,49	3,63E-03	50	0,99	8,76E-04

Таблица П2.4

Преобразование энергетического разбиения спектра тормозного излучения,
выходящего «вперед» из вольфрамовых мишеней(M1S5)

E(),МэВ	1/(МэВ·электрон)	N(E)
0,0-0,01	0	0,00E+00
0,01-0,02	0	0,00E+00
0,02-0,05	0	0,00E+00
0,05-0,1	0	0,00E+00
0,1-0,2	6,01E-02	6,01E-03
0,2-0,3	4,97E-02	4,97E-03
0,3-0,4	3,39E-02	3,39E-03
0,4-0,5	2,18E-02	2,18E-03
0,5-0,6	1,53E-02	1,53E-03
0,6-0,7	9,72E-03	9,72E-04
0,7-0,8	9,07E-03	9,07E-04
0,8-0,9	6,48E-03	6,48E-04
0,9-1,0	4,62E-03	4,62E-04