РАСЧЕТ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКОЙ КОЛЛИМАЦИИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Д.И. Гранин¹, О.В. Пашков¹, П.А. Медведев¹, А.К. Куппа¹, А.С. Жемчугов² ¹ ООО "Градиация", Санкт-Петербург ² Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Цель: Определение оптимальных параметров системы сферической коллимации гамма-терапевтического аппарата.

<u>Материал и методы:</u> Численное моделирование методом Монте-Карло параметров системы коллимации в программном пакете Geant4.

<u>Результаты:</u> Моделирование в программном пакете Geant4 является надежным инструментом для решения подобного рода задач, что подтверждено согласием расчётных и экспериментальных данных. Предложенная система сферической коллимации пучка при использовании источника, подобного ГИК-9-3(4) (изготовитель ПО "Маяк"), при значении РИП=1000 мм способна обеспечить требуемые характеристики радиационного поля во всем диапазоне его размеров. Представляется целесообразным рассмотреть уменьшение радиационной утечки с помощью зубчатой формы соприкасающихся поверхностей створок коллиматора, поскольку доза в основном обусловлена утечкой через неплотно соединенные створки коллиматора, сведенного в отрицательный угол.

<u>Заключение:</u> Проведённый расчёт системы коллимации позволяет использовать полученные результаты для конструирования радиационных головок гамма-терапевтических аппаратов без дополнительных научных исследований. В работе представлено подробное описание использованных в Geant4 библиотек физических процессов, что позволяет читателю при необходимости повторить эксперимент для геометрии своих гамма-терапевтических аппаратов.

Ключевые слова: гамма-терапевтический аппарат, система коллимации, полутень, радиационная защита, источник типа ГИК-9-3(4), метод Монте-Карло, Geant4 DOI: 10.52775/1810-200X-2022-94-2-46-63

Введение

Дистанционная гамма-терапия широко применяется при лечении различных злокачественных и доброкачественных опухолей. Принцип лечения заключается в воздействии ионизирующего гамма-излучения на клетки опухоли пациента, приводящего к образованию радиационных повреждений в клетках опухоли и их последующему разрушению. Таким образом, целью дистанционной лучевой гамма-терапии является подведение максимальной поглощенной дозы ионизирующего излучения к опухоли. Очевидно, что при этом должно быть минимизировано облучение прилегающих здоровых тканей. Одновременное выполнение этих условий возможно лишь при достаточно жестких требованиях на такие характеристики рабочего поля гамма-аппарата, как однородность дозного распределения, его симметричность и величина полутени на краях рабочего поля. Поэтому одним из основных элементов аппарата для дистанционной лучевой гамма-терапии является коллиматор, который предназначен для формирования терапевтического пучка заданной формы и размера из первоначального пучка гамма-квантов от радионуклидного источника путем полного поглощения выбранной части пучка в створках коллиматора и прохождения оставшейся части пучка без поглощения.

В случае гамма-терапевтического аппарата, позволяющего изменять размер рабочего поля в широких пределах, например при помощи подвижного сферического коллиматора, указанные характеристики должны достигаться для всех полей, создаваемых аппаратом.

Для расчета оптимальной конструкции системы сферической коллимации, позволяющей достичь наилучших характеристик дозного распределения в области рабочего поля, была разработана компьютерная модель сферического коллиматора и выполнены численные расчеты дозного распределения при различных параметрах конструктивных элементов радиационной головки. Ниже приведены описание компьютерной модели и результаты расчетов.

В данной работе обсуждается конструкция системы коллимации без многолепесткового коллиматора (МЛК), для таких аппаратов как Theratron, Terabalt, Bhabhatron или Рокус. МЛК является неотъемлемой частью современного аппарата для лучевой терапии и предметом отдельного исследования, лежащего за рамками данной статьи.

Описание модели и методика расчетов

Моделирование системы сферической коллимации включает в себя:

- ✓ Моделирование источника гамма-квантов с параметрами, соответствующими наиболее применяемому в России источнику ГИК-9-4 (изготовитель – ПО "Маяк"). Спектр излучения источника практически совпадает со спектром радионуклида Со-60. Активность источника при расчетах принята равной 10000 Ки.
- Моделирование физических процессов, связанных с взаимодействием гамма-квантов и

вторичных частиц с веществом коллиматора и расчет потока и спектра ионизирующего излучения на заданном расстоянии источник-поверхность (РИП).

- ✓ Расчет дозного распределения, создаваемого источником при заданных параметрах сферической системы коллимации.
- ✓ Анализ формы распределения дозы в рабочем поле, контроль и оптимизация параметров сферического коллиматора.

В данной работе для моделирования физических процессов методом Монте-Карло в веществе применялся программный пакет Geant4 версии 4.10.00 [1]. Программа моделирования состоит из вычислительного ядра, основанного на программном пакете Geant4, графического интерфейса пользователя и нескольких вспомогательных подпрограмм, обеспечивающих расчет зависимости мощности эквивалентной дозы от потока и спектра излучения, построение радиационных полей, профилей и расчет параметров полей.

Описание источника гамма-излучения

В защитно-радиационных головках гамма-аппаратов используются закрытые источники гамма-излучения с закрытым радионуклидом ⁶⁰Со типа ГИК-9-3(4) (изготовитель ПО "Маяк") или их аналоги с активностью до 15000 Ки (рис. 1).

При моделировании спектра источника энергия гамма-кванта принимает значения основных энергетических гамма-линий нуклида источника. Ширина линий считается нулевой. Энергия линий, радиационный выход и время полураспада нуклида ⁶⁰Со задаются согласно базе данных ENSDF [2]. В частности, энергия



Рис. 1. Источник излучения ⁶⁰Со типа ГИК

48

ИСТОЧНИКИ ТИП ГИ	<
------------------	---

Тип источника						
						Ки
	ГИК-9-1		33(24.5)	2.50-10-4	1.79-10 ¹⁴	4.85-10 ³
	ГИК-9-2	23(21)		3.20-10-4	2.31-1014	6.25-10 ³
	ГИК-9-3			4.00-10-4	2.89-1014	7.80-10 ³
	ГИК-9-4			5.00-10-4	3.63-1014	9.80-10 ³
	ГИК-10-1	13(10)	26.5(17.8)	2.5010 ⁻⁵	1.72-1013	4.65-10 ²
	ГИК-10-2			5.00·10 ⁻⁵	3.40-10 ¹³	9.2-10 ²
	ГИК-10-3			7.00 - 10-5	4.81-10 ¹³	1.30-10 ³
2	ГИК-11-1	11(0)	50(40.8)	3.20-10-5	1.78-1013	4.80-10 ²
	ГИК-11-2	11(8)		1.25.104	6.8-10 ¹³	1.85-10 ³
	ГИК-12-1		25(18)	6.30·10 ⁻⁵	3.52·10 ¹³	9.5-10 ²
	ГИК-12а-1		99(90.5)	4.00-10-5	2.22·10 ¹³	6.00-10 ²
	ГИК-12а-2	11(8)		9.0-10-5	5.00-10 ¹³	1.35-10 ³
	ГИК-12а-3			1.25.104	6.8-10 ¹³	1.85-10 ³
	ГИК-12а-4			1.80-10-4	1.00-1014	2.70-10 ³
	ГИК-13-1	4(2.5)	5(2.5)	1.50-10-7	8.0-10 ¹⁰	2.15
1	ГИК-14-1	19(15)	22(14)	1.25.104	7.4-10 ¹³	2.00-10 ³
2	ГИК-17М	21(17)	34(26)	6.50-10-4	4.54-1014	1.23-104

Рис. 2. Параметры источников излучения ⁶⁰Со типа ГИК



Энергия гамма-квантов, МэВ

Рис. 3. Энергетический спектр источника гаммаизлучения ⁶⁰Со

линий установлена равной 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ (рис. 2 и 3). Активность источника используется для нормировки потока ионизирующего излучения и является необходимым параметром модели. Во всех расчетах активность источника принята равной 10000 Ки. Источник имеет цилиндрическую форму, геометрические размеры источника соответствуют размерам источника ГИК-9-4.

Описание моделирования физических процессов в веществе

Моделирование физических процессов в веществе осуществляется с применением подходов и алгоритмов, реализованных в программном пакете Geant4 для всех материалов и геометрических конфигураций. Элементарный акт взаимодействия моделируется в два этапа:

- Транспортировка частицы до точки взаимодействия (длина шага до точки взаимодействия определяется наименьшей из длин, вычисленных на основании длины свободного пробега для каждого физического процесса, учитываемого в моделировании).
- 2. Генерация продуктов взаимодействия и определение их характеристик (тип, энергия, импульс и т.д.), а также расчет энерговыделения в точке взаимодействия.

Эта процедура выполняется для всех вторичных частиц. В рассматриваемой модели вторичные частицы могут быть гамма-квантами, электронами и позитронами. Для этих частиц в моделировании учитываются следующие физические процессы:

- фотоэлектрический эффект, включая характеристическое излучение и испускание Ожеэлектронов;
- ✓ комптоновское рассеяние;
- ✓ рэлеевское рассеяние;
- образование электрон-позитронных пар гамма-квантами;
- ионизационные потери энергии электронами и позитронами;
- ✓ тормозное излучение электронов и позитронов;
- ✓ многократное кулоновское рассеяние электронов и позитронов;
- 🗸 аннигиляция позитронов.

Моделирование физических процессов осуществляется с помощью набора моделей PENELOPE [3], имеющего пределы применимости для частиц с энергией от 1 ГэВ до 1 эВ, в случае комптоновского и рэлеевского рассеяния, и до 10 эВ для тормозного излучения.

Взаимодействие гамма-квантов с веществом

Основными процессами взаимодействия гамма-квантов с веществом в рассматриваемом диапазоне энергий 0–2 МэВ являются фотоэлектрический эффект, комптоновское и рэлеевское рассеяние и рождение электрон-позитронных пар.

Фотоэлектрический эффект

Полное сечение процесса и определяется по таблицам из базы данных EPDL97 [4] для гамма-квантов с энергией менее 600 кэВ. Для гамма-квантов с большей энергией используется параметризация:

$$\sigma(E) = a_1/E + a_2/E^2 + a_3/E^3 + a_4/E^4 + a_5/E^5. \quad (1)$$

Данная параметризация обеспечивает погрешность менее 1 %. Моделирование вторичных частиц производится следующим образом. При взаимодействии гамма-квант исчезает, и далее моделируется транспорт электрона с энергией, равной разности энергии гаммакванта и энергии связи для соответствующего уровня. Угловое распределение электрона моделируется по формуле Саутера-Гаврила согласно [5] и [6]. Атом остается в возбужденном состоянии. Релаксация атома происходит путем испускания характеристического излучения или Оже-электрона. Моделирование процесса релаксации в обоих случаях происходит сходным образом, на основании таблиц энергий атомных уровней и вероятностей переходов, имеющихся в базе данных EADL [7]. Обычно моделируется один характеристический фотон и (или) один-два Оже-электрона. Если необходимые сведения отсутствуют в базе данных, релаксация моделируется как увеличение энерговыделения в точке взаимодействия на величину энергии возбуждения атома.

Комптоновское рассеяние

Полное сечение процесса определяется по таблицам из базы данных EPDL97. Энергия и угол рассеяния гамма-кванта случайно разыгрывается согласно формуле Клейна-Нишина при помощи следующей функции отбраковки:

$$g(E) = (1 - E \sin^2 \theta / (1 + E^2)) SF(q),$$
(2)

где *q* обозначает передачу импульса при рассеянии, а *SF*(*q*) – функция рассеяния, подавляющая малоугловое рассеяние при низких энергиях [8]. Характеристики электрона отдачи вычисляются исходя из законов сохранения энергии и импульса.

Рэлеевское рассеяние

Полное сечение процесса определяется по таблицам из базы данных EPDL97. Угол рассеяния гамма-кванта случайно разыгрывается согласно формуле:

 $\Phi(\theta)=(1+ [\cos^2(\theta))\sin(\theta)F(2E\sin(\theta/2)),$ (3) где F(q) – форм-фактор, учитывающий слабую зависимость углового распределения от энергии гамма-кванта при высоких энергиях [8].

Рождение электрон-позитронных пар

Полное сечение процесса определяется по таблицам из базы данных EPDL97. Энергия вторичных электронов разыгрывается по формуле Бете–Гайтлера согласно [9]. Полярный угол электрона относительно направления движения гамма-кванта вычисляется согласно параметризации, приведенной в [10]. Характеристики позитрона рассчитываются исходя из законов сохранения энергии и импульса.

Взаимодействие электронов с веществом

Основными процессами взаимодействия электронов и позитронов с веществом являются потери энергии на ионизацию и тормозное излучение и многократное кулоновское рассеяние, а также аннигиляция позитронов.

Ионизационные потери и тормозное излучение

Для вычисления величины потерь энергии на ионизацию используются имеющиеся в базе данных EEDL [11] таблицы сечений, экспериментально измеренных для различных атомов при различных энергиях электрона, а также таблицы пороговых энергий образования дельта-электронов. Количество актов ионизации на длине шага определяется согласно распределению Пуассона. Моделирование конечного состояния происходит в три этапа. На первом этапе случайным образом выбирается энергетический уровень атома. Затем, если энерговыделение выше порога рождения дельта-электрона, разыгрывается энергия дельтаэлектрона. На третьем этапе разыгрывается угол рассеяния налетающего электрона и угол вылета дельта-электрона. Атом остается в возбужденном состоянии, и релаксация его моделируется способом, аналогичным описанному в разделе, посвященном фотоэлектрическому эффекту.

Моделирование тормозного излучения осуществляется сходным образом, на основании табулированных значений энергетических потерь и порогов образования гамма-квантов из базы данных EEDL [11]. Основную трудность представляет угловое распределение гаммаквантов, для моделирования которого существует несколько различных способов. В данной работе реализован алгоритм 2BS, сочетающий достаточно хорошее описание экспериментальных данных и высокую эффективность вычислений в рассматриваемом диапазоне энергий 0–2 МэВ. Описание алгоритма 2BS приведено в [12].

Многократное кулоновское рассеяние

Для моделирования многократного кулоновского рассеяния применяется метод укрупненных столкновений, позволяющий повысить быстродействие и уменьшить вычислительную погрешность. При транспорте частицы многократное рассеяние не принимается во внимание при вычислении длины шага. Вместо этого рассчитывается смещение и изменение направления движения частицы, обусловленное многократным рассеянием, для длины шага, заданной другими физическими взаимодействиями или ограничениями геометрии. Для расчета смещения и углового отклонения при моделировании используется модель Урбана [13], основанная на теории Льюиса для неограниченной среды [14]. В рамках этой модели, угловое распределение задается уравнением:

$$G(u) = p(qG_1(u) + (1-q)G_2(u)) + (1-p)G_3(u), \quad (4)$$

где $u=\cos(\theta)$, $G_1(u)=C_1e^{-\alpha(1-u)}$, $G_2=C_2/(b-u)^d$, $G_3=C_3$. Случайные числа p, q выбираются в интервале [0,1]. Величины a, b, d, C_1 , C_2 , C_3 являются параметрами модели Урбана.

Аннигиляция позитронов

При аннигиляции электрона и позитрона моделируется образование двух гамма-квантов. Вклад процессов аннигиляции с образованием одного или трех и более гамма-квантов пренебрежимо мал, и эти процессы не учитываются. Сечение аннигиляции рассчитывается по формуле Гайтлера:

$$\sigma(Z,E) = \frac{Z\pi r_e^2}{\gamma + 1} \left(\frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right), \quad (5)$$

где E – энергия позитрона, $\gamma = E/mc^2$, r_e – классический радиус электрона.

Энергия гамма-квантов определяется исходя из дифференциального сечения, записываемого в виде:

$$\frac{d\sigma(Z,E)}{d\varepsilon} = \frac{Z\pi r_e^2}{\gamma+1} \frac{1}{\varepsilon} \left(1 + \frac{2\gamma}{(\gamma+1)^2} - \varepsilon - \frac{1}{(\gamma+1)^2} \frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (5)$$

где *є* – доля полной энергии позитрона, уносимая гамма-квантом. Угол вылета определяется законами сохранения энергии и импульса:

$$\cos\theta = \frac{\varepsilon(\gamma+1)-1}{\varepsilon\sqrt{\gamma^2-1}}.$$
(6)

Азимутальный угол разыгрывается равномерно в интервале $[0,2\pi]$.

Таким образом, все модели, за исключением модели многократного кулоновского рассеяния, опираются на параметризацию экспериментально измеренных таблиц сечений и энергий атомных оболочек, содержащихся в базах данных EPDL97 [4], EEDL [11] и EADL [7]. В результате моделирования регистрировались частицы, дошедшие до поверхности виртуального детектора, находящегося на расстоянии РИП=100 см. Пространство вне сферического коллиматора считалось заполненным воздухом при атмосферном давлении. Для каждой частицы сохранялись координаты пересечения детектора, направление движения, энергия и тип частицы.

Описание методики расчета мощности эквивалентной дозы

Моделирование транспортировки и поглощения гамма-квантов в материале позволяет определить поток частиц и их спектр в заданной точке пространства вокруг исследуемого объекта в соответствии с заданной активностью источника. Очевидно, что изменение активности источника будет приводить к пропорциональному изменению флюенса частиц. На расстоянии одного метра от источника излучения ионизирующее излучение состоит, в основном, из гамма-квантов с небольшой (~1 %) примесью вторичных электронов. В дальнейшем, при расчете эквивалентной дозы вклад электронов считался пренебрежимо малым и учитывалось только гамма-излучение.

Для расчета мощности эквивалентной дозы сначала определялась мощность поглощенной дозы согласно методике, предлагаемой для реальных измерений методическими рекомендациями МАГАТЭ [15]. Было выполнено дополнительное моделирование водного фантома, имеющего на опорной глубине 5 см "чувствительный" слой толщиной 1 см, в котором регистрировалось среднее энерговыделение для различных энергий налетающих гамма-кван-



Рис. 4. Схема моделирования при расчете зависимости энергия-доза



Рис. 5. Зависимость поглощенной дозы в воде от энергии гамма-кванта. Толщина экранирующего слоя воды 5 см. Показаныаппроксимация зависимости полиномомом третьей степени и значения коэффициентов полинома (p₀-p₃)

тов. Площадь чувствительного слоя составляла 100 см², схема моделирования представлена на рис. 4 и описана в работе [16].

Полученная зависимость аппроксимировалась полиномом 3-й степени и применялась для вычисления мощности поглощенной дозы при моделировании сферического коллиматора. Полученный поток излучения в результате полного моделирования прохождения гаммаквантов через вещество сферического коллиматора преобразовывался в мощность поглощенной дозы на основании известной энергии гамма-квантов и полученной зависимости "доза-энергия", представленной на рис. 5. Усреднение проводилось на статистике 1 млн историй гамма-квантов, что уменьшает вероятность статистических флуктуаций до пренебрежимо малого уровня. Поскольку взвешивающий радиационный коэффициент при расчете эквивалентной дозы для гамма-излучения считается равным единице [16], то мощность эквивалентной дозы (в мкЗв/ч) численно равна мощности поглощенной дозы (в мкГр/ч).

Описание эскизной модели системы сферической коллимации

Защитно-радиационная головка для размещения системы сферической коллимации должна иметь конический грот с фланцем для крепления коллиматора, ось которого перпендикулярна оси канала механизма перемещения источника. Центр грота должен совпадать с осью размещения источника. Ниже приведен эскизный проект системы, приведенные размеры являлись начальными и в процессе работы претерпели существенные изменения (рис. 6 и 7).

Сферический коллиматор эскизного проекта состоит из первичного коллиматора, вторичного коллиматора, двух пар створок сферического коллиматора и одной пары триммерных створок (в процессе работы было принято использовать 2 пары триммерных створок).

Согласно эскизному проекту, расстояние между нижней поверхностью радиоактивного первичного источника И коллиматора составляет 13,5 мм. Толщина первичного коллиматора составляет 100 мм, первичный коллиматор содержит полость в форме конуса для формирования поля и защиты пациента от излучения утечки. Вторичный коллиматор размещен сразу под первичным коллиматором, нижняя граница вторичного коллиматора образована в виде дуги радиусом 305 мм, причем вторичный коллиматор имеет полость в виде усеченной пирамиды для формирования квадратного поля максимального размера. Пара створок сферического коллиматора размещена под вторичным коллиматором на расстоянии 15 мм. Створки расположены парой друг напротив друга в фронтальной и сагиттальной плоскостях и совершают движения по радиусу относительно центра нижней поверхности радиоактивного источника. Расстояние между парами створок – 5 мм. Толщина верхней пары створок 80 мм, нижней - 100 мм. В эскизном проекте заложена идея "сросшейся" нижней створки сферического коллиматора с парой триммерных створок, в результате нижняя створка сферического коллиматора не имеет



Рис. 6. Модель сферического коллиматора в среде Geant4



Рис. 7. Эскизный проект сферического коллиматора

"подрезающей" створки. Для верхней створки сферического коллиматора на одной направляющей скобе размещена пара триммерных створок, для возможности формирования симметричных полей. Расстояние между подрезающими блоками и створками сферического коллиматора составляет 5 мм. Толщина триммерных створок 30 мм.

Материал исполнения первичного коллиматора, створок сферического коллиматора и триммерных створок – вольфрамовый сплав ВНД. Вторичный коллиматор выполнен из свинцового сплава.

Определение требуемых характеристик радиационного поля

Минимальный и максимальный размер радиационного поля определяется в изоцентре в области 80 % ширины пучка.

Полутень – параметр, характеризующий радиальный градиент поля излучения на боковой границе пучка. В настоящей работе будет определяться как расстояние от оси пучка, на котором в профиле дозного распределения происходит спад значения дозы с 80 до 20 %.

Неравномерность и симметричность радиационного поля-характеристики радиационного поля, определяемые по профилям дозного распределения.

Равномерность пучка *F* определяется по профилю дозного распределения согласно выражению:

$$F = (D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min}) \times 100 \%,$$
 (7)

где D_{max} и D_{min} – максиальное и минимальное значение дозы в точках, расположенных в области плато (80 % ширины пучка).

№	Наименование	Единица измерения	Диапазон допустимых значений
1	Максимальный размер радиационного поля в изоцентре	СМ × СМ	43×43, не менее
2	Размер полутени при установке управляемых триммеров	СМ	1, не менее
3	Минимальный размер радиационного поля в изоцентре	СМ × СМ	4×4, не более
4	Неравномерность радиационного поля в пределах 80 % ширины пучка для максимального размера поля при измерении на глубине 10 см в водном фантоме при РИП=100 см	%	3, не более
5	Радиационная утечка через коллиматор	%	2, не более
6	Допустимые отклонения симметричности радиационного поля для размеров поля от 10×10 см до 35×35 см	%	3, не более

Требования к сферическому коллиматору

Симметричность пучка S определяется в точках профиля пучка симметричных относительно продольной оси согласно выражению:

 $S = \text{Max} | Point_{\text{L}} - Point_{\text{R}} | / D_{\text{CAX}} \times 100 \%, \quad (8),$

где $Point_L$ и $Point_R$ – точки, лежащие в области плато (80 % ширины профиля) равноудаленные от центральной оси точки, для которых разница в дозе максимальна, D_{CAX} – доза на центральной оси.

Равномерность и симметричность пучка, а также величина полутени определяются в результате дозиметрических измерений распределений в анализаторах дозного поля. В настоящей работе симметричность и равномерность пучка для предложенной системы коллимации оцениваются в результате компьютерного моделирования системы коллимации и процесса прохождения через неё частиц при помощи пакета библиотек Geant4.

Радиационная утечка через коллиматор определяется как отношение поглощенной дозы на стандартном расстоянии источник излучения – поверхность в любой точке площади, защищаемой коллиматором к максимально поглощенной дозе в радиационном поле размером 10×10 см.

Все перечисленные характеристики сферического коллиматора представлены в табл. 1.

Оценка погрешностей

Основной вклад в погрешность мощности эквивалентной дозы вносит статистическая неопределенность, связанная с флуктуациями числа гамма-квантов, пересекающих участки изоплоскости. Для контроля статистической погрешности сохранялось число гамма-квантов для каждого участка, из которого вычислялась относительная погрешность, определяемая как $1/\sqrt{N}$, где N – число гамма-квантов. Статистическая погрешность всех производных величин (асиммеричности поля, неоднородности, поперечного размера профиля и т.д.) определялась исходя из статистических погрешностей в каждом участке изоплоскости по стандартным формулам распространения погрешностей.

Описание оптимальной конструкции первичного и вторичного коллиматора

В результате моделирования системы первичной коллимации радиационной головки была сформирована оптимальная конструкция двух ее составляющих (рис. 8). Условно составляющие обозначены как первичный и вторичный коллиматоры. Первичный коллиматор выполнен из вольфрамового сплава, вторичный из свинца.

Моделирование первичного коллиматора, основанного на эскизном проекте радиационной головки и имеющего коническую

Таблица 1



Рис. 8. Описание конструкции для моделирования

апертуру, показало, что это приводит к значительной неоднородности распределения дозы при больших размерах рабочего поля. Неоднородность обусловлена затенением в углах прямоугольного (в общем случае) рабочего поля, которое формируется круглым поперечным сечением конической апертуры первичного коллиматора в сочетании с протяженным источником гамма-квантов. Для достижения лучших характеристик рабочего поля представляется целесообразным перейти к апертуре первичного коллиматора в форме усеченной пирамиды.

Технологически предусмотрен зазор между первичным и вторичным коллиматорами в 10 мм. Это расстояние отведено для размещения стальной окантовки вторичного коллиматора.

Так как первичный коллиматор размещается под устройством, в котором будет передвигаться источник (как в аппаратах Theratron, Bhabhatron), то минимальное расстояние, с учетом технологической стыковки этих узлов, равно 20 мм. Чем ниже размещен источник к первичной коллимации, тем больше статистическая вероятность прохождения гамма-квантов через входное отверстие в целом, и как следствие, тем выше профиль радиационного поля. В связи с этим размер 20 мм между первичной коллимацией и нижней гранью источника является оптимальным.

Внешний радиус вторичного коллиматора составляет 305 мм и, соответственно, длина



Рис. 9. Исследование входного отверстия первичного коллиматора. По оси X – половина стороны входного отверстия первичного коллиматора (мм), по оси Y слева – размер получаемого поля в мм × мм. По оси Y справа – получаемые полутени в мм

вторичного коллиматора равна 175 мм. Эти размеры расчету были зафиксированы и оптимизации в рамках данной работы не подлежали.

Исследование параметра COLL1_RMIN

Параметр COLL1_RMIN соответствует половине стороны входного отверстия первичного коллиматора. Влияние размера COLL1_RMIN на радиационное поле представлено на рис. 9. Из графика видно, что наилучшие полутени 11 мм получаются при входном отверстии от 16 мм и более, далее с ростом входного отверстия первичного коллиматора снижение полутеней прекращается. Размер COLL1_RMIN выбран равным 17 мм исходя из оптимальных сочетаний полутеней, защиты и амплитуды профиля радиационного поля.

Исследование параметра COLL2_WMAX

Параметр COLL2_WMAX соответствует половине стороны выходного отверстия вторичного коллиматора. Влияние размера COLL2_WMAX на радиационное поле представлено на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что выполнение требования к неравномерности радиационного поля 3% выполняется только тогда, когда COLL2_WMAX равно и больше 78 мм. С другой стороны, увеличение этого параметра ведет за собой необходимость увеличивать размеры блоков, чтобы перекрывать поле и не допускать утечек излучения через коллиматор.



Рис. 10. Исследование выходного отверстия вторичного коллиматора. По оси X – половина стороны выходного отверстия вторичного коллиматора. По оси Y слева – размер получаемого поля в мм × мм. По оси Y справа – неравномерность получаемого радиационного поля в %



Puc. 11. Исследование расстояния между вторичным коллиматором и створками сферического коллиматора

Исследование параметра JAWS_ZPOZ

Параметр JAWS_ZPOZ соответствует расстоянию между внешним радиусом вторичного коллиматора и внутренним радиусом первой пары створок сферического коллиматора. Влияние размера JAWS_ZPOZ на радиационное поле представлено на рис. 11. По оси Уотложена неравномерность в %, по оси Х расстояние между вторичным коллиматором и створками сферического коллиматора. Из табл. 2 можно сделать вывод, что максимальная неравномерность проявляется на малых полях. По техническому заданию неравномерность поля должна лежать в пределах до 3 % при размерах поля от 100×100 мм до 350×350 мм, поэтому достаточно исследовать неравномерность для поля 100×100 см (на рис. 11 приведена также зависимость неоднородности и для поля 200×200 мм).



Рис. 12. Исследование толщины створок сферического коллиматора

Исследование параметров ТООТН1_DZ и ТООТН2_DZ

Параметры TOOTH1_DZ и TOOTH2_DZ соответствуют толщине первой и второй паре створок сферического коллиматора соответственно. Влияние размеров TOOTH1_DZ и TOOTH2_DZ на радиационное поле представлено на рис. 12. По оси Ууказаны получаемые полутени для радиационных полей в мм, по оси X – размеры радиационного поля в мм.

Из рис. 12 видно, что увеличение толщины створки, с одной стороны, ведет к уменьшению полутеней радиационных полей, а с другой стороны ведет к увеличению массы и стоимости конструкции. В связи с этим размер ТООТН1_DZ и ТООТН2_DZ был выбран равным 55 мм, что полностью удовлетворяет требованию технического задания для размеров полутеней для полей вплоть до 430×430 мм.

Исследование параметра ТООТНЗ4_DZ

Параметр ТООТНЗ4_DZ соответствует толщине первой и второй паре триммерных створок сферического коллиматора. Влияние размера ТООТНЗ4_DZ на радиационное поле представлено на рис. 13. По оси *Y* указаны получаемые полутени для радиационных полей в мм, по оси *X* размеры поля в мм.

Из рис. 13 видно, что увеличение толщины створки сферического коллиматора ведет к уменьшению полутеней радиационных полей, с одной стороны, а с другой стороны увеличение толщины ведет к увеличению массы и стоимости конструкции. В связи с этим, размер ТООТНЗ4_DZ был выбран равным 20 мм, что полностью удовлетворяет требованию технического задания для размеров полутеней для полей вплоть до 430×430 мм.

Таблица 2

Тисс-интипиро парамотры раднационным полон								
Реальный размер	Угол раскрытия	Угол раскрытия	Расчетный размер поля	Усредненная неравномерность по	Усредненная асимметричность			
поля по	коллимации,	коллимации,	по изодозе	профилям	по профилям			
изодозе	градусы	радианы	80 %, мм	ХиҮ, %	<i>Х</i> ́и Ŷ, %			
10 00	0.0158	0.0003	0.6	96 47	22.96			
20.00	0.3032	0.0053	10.6	95.99	22,00			
30.00	0,5002	0,0000	20.6	83.27	24,00			
40.00	0,000	0.0153	30.6	51.97	18.81			
50.00	1 1652	0.0203	40.7	33.71	13.29			
60.00	1,1002	0.0254	50.7	22.01	10,20			
70.00	1,4320	0.0304	60.8	14.35	8 25			
80.00	2 0273	0.0354	70.8	8 56	6.67			
90.00	2,3147	0.0404	80.8	5.57	5.13			
100.00	2,6020	0.0454	90.9	2.93	2.57			
110.00	2,8894	0.0505	100.9	1.47	1.55			
120.00	3 1767	0.0555	111.0	1.21	1,39			
130.00	3 4641	0.0605	121.1	1.25	1,56			
140.00	3 7514	0.0656	131.1	1 19	1.23			
150.00	4.0388	0.0706	141.2	1,10	1.59			
160,00	4.3261	0.0756	151.3	1.33	1.48			
170.00	4 6135	0.0807	161,0	1.28	1,10			
180.00	4 9009	0.0857	171.5	1 46	1,11			
190.00	5,1882	0.0908	181.6	1,10	1,11			
200.00	5.4756	0.0959	191,7	1.34	1.28			
210.00	5,7629	0.1009	201.8	1.57	1,18			
220.00	6.0503	0.1060	212.0	1,50	1,10			
230.00	6.3376	0.1111	222.1	1.59	1,01			
240.00	6.6250	0.1161	232.3	1.57	1.01			
250.00	6,9124	0.1212	242.5	1.66	0.83			
260.00	7,1997	0.1263	252.6	1.75	1.25			
270.00	7,4871	0.1314	262.8	1,70	1.15			
280.00	7,7744	0.1365	273.0	1.81	1.02			
290.00	8.0618	0.1416	283.3	1.91	0.93			
300.00	8.3491	0.1468	293.5	1.93	1.04			
310.00	8,6365	0.1519	303.8	2.11	1.09			
320,00	8,9239	0,1570	314,0	2,13	0,82			
330.00	9.2112	0.1622	324.3	2.13	0.99			
340.00	9,4986	0.1673	334.6	2.31	0.95			
350,00	9,7859	0,1725	344,9	2,28	0,91			
360,00	10,0733	0,1776	355,3	2,37	0,88			
370,00	10,3606	0,1828	365.6	2,40	1,03			
380,00	10,6480	0,1880	376,0	2,63	0.99			
390,00	10,9353	0,1932	386,4	2,50	0,83			
400,00	11,2227	0,1984	396,8	2,58	0,94			
410,00	11,5101	0,2036	407,3	2,76	1,00			
420,00	11,7974	0,2089	417,7	2,85	0,93			
430,00	12,0848	0,2141	428,2	2,93	0,78			

Рассчитанные параметры радиационных полей



Рис. 13. Исследование выходного отверстия вторичного коллиматора

Исследование параметра SHIFT_COLL_TRIMS2

Параметр SHIFT_COLL_TRIMS2 соответствует смещению конструкции сферических створок относительно основной оси вращения, проходящей через центр источника и изоцентр. Параметр SHIFT_COLL_TRIMS2 не изменяет точку подвеса створок. Влияние величины



Рис. 14. Исследование сдвига основных створок сферического коллиматора

SHIFT_COLL_TRIMS2 на радиационное поле представлено на рис. 14. По оси Ууказаны размеры получаемых радиационных полей в мм, по оси *X* – сдвиг основных створок сферического коллиматора в мм.

Анализ показал, что при параметре JAWS_ZPOZ, равному 25 мм, неравномерность радиационного поля лежит в пределах 3 % как для поля 100×100 мм, так и для поля 200×200 мм. Дальнейшее увеличение параметра JAWS_ZPOZ не представляет интереса, несмотря на снижение неоднородности, по причине увеличения размеров створок сферического коллиматора, а как следствие, увеличение массы и стоимости конструкции.

Из рис. 14 видно, что оптимальной величиной сдвига является значение 9 мм. Меньшее значение не дает возможности объемному источнику гамма-квантов сформировать поле 430×430 мм при любом раскрытии створок, как минимум, из геометрических соображений. Большее значение сдвига не обеспечивает необходимую апертуру для формирования поля, в результате чего профиль поля уменьшается, а полутени увеличиваются.

Исследование параметра SHIFT_TRIMS

Параметр SHIFT_TRIMS соответствует смещению конструкции триммерных створок относительно основной оси, проходящей через центр источника и изоцентр. Параметр SHIFT_TRIMS не изменяет точку подвеса створок. Влияние величины SHIFT_TRIMS на радиационное поле представлено на рис. 15. По оси Y указаны размеры получаемых радиа-



Рис. 15. Исследование сдвига триммерных створок сферического коллиматора

ционных полей в мм, по оси *X* – сдвиг триммерных створок сферического коллиматора в мм.

Из рис. 15 видно, что оптимальной величиной сдвига является значение, равное 5 мм. Как и в случае с основными створками сферического коллиматора, недостаточное значение сдвига триммерных створок не обеспечивает геометрию, позволяющую формировать требуемые поля. При увеличении сдвига больше 5 мм, растут полутени во всем диапазоне полей, что не позволяет выполнить требования технического задания для полутеней, а именно менее 10 мм.



Рис. 16. Исследование ширины триммерных створок сферического коллиматора

"МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА"



Рис. 17. Исследование длины сферического коллиматора

Исследование параметра ТООТН_W

Параметр ТООТН_W соответствует ширине триммерных створок. Влияние величины ТООТН на радиационное поле представлено на рис. 16. По оси *Y* указана неравномерность получаемых радиационных полей в %, по оси *X* – ширина триммерных створок.

Из рис. 16 видно, что выполнение требований технического задания по неравномерности поля не более 3 % возможно только для триммерных створок шириной от 50 мм. Неравномерность поля формируется в основном из-за проникающих через створки гамма-квантов, которые являются причиной утечки излучения через коллиматор. Поэтому чем уже триммер, тем больше площадь попадания гамма-квантов за триммерные створки, а как следствие - рост неравномерности поля. Из геометрических соображений, оптимальным размером ТООТН_W является 55 мм. Этой ширины достаточно, чтобы перекрыть поток гаммаквантов за триммерные створки и достаточно для того, чтобы эффективно "подрезать" поля, формируя необходимые полутени.

Исследование параметра ZPOZ_TRIMS

Параметр ZPOZ_TRIMS соответствует расстоянию между внешним радиусом нижней пары створок сферического коллиматора и внутренним радиусом верхней пары триммерных створок. Влияние величины ZPOZ_TRIMS на радиационное поле представлено на рис. 17. По оси Y отмечены получаемые полутени радиационных полей в мм, по оси *X* – размеры радиационных полей в мм.

Из рис. 17 видно, что наилучшие полутени получаются при более низком расположении триммерной пары створок. При значении длина ZPOZ_TRIMS 90 мм коллиматора составляет 600 мм, что соответствует техническому заданию. Для коллиматора, предназначенного для формирования поля до 350×350 мм, можно сократить значение до 70 мм, что будет соответствовать длине коллиматора 580 мм.

Угловая зависимость раскрытия коллиматора

В связи с тем, что размер радиационного поля, сформированного сферическим коллиматором, измеряется по изодозе 80 %, геометрический раствор створок не совпадает с реальным размером радиационного поля. В связи с этим были выведены зависимости радиационного поля от угла раскрытия коллимации по изоцентру 700, 1000 и 1300 мм (рис. 18–20).



Рис. 18. Зависимость размера поля от угла раствора коллиматора при РИП=700 мм





Рис. 19. Зависимость размера поля от угла раствора коллиматора при РИП=1000 мм

Радиационная утечка через коллиматор

Согласно ГОСТ 50267.11-99, радиационная утечка через коллиматор должна не превышать 2 %. Для закрытого коллиматора максимальная доза утечки накапливается в изоцентре. Таким образом, достаточным условием выполнения требования радиационной утечки является вычисление отношения дозы в изоцентре при сведенном коллиматоре (отрицательный угол сведения) к дозе при поле 100×100 мм. Отношение доз составляет 1,6 % при плотности вольфрамового сплава 17, г/см³, для большей плотности отношение доз будет меньше, также меньше будет это отношение в любой другой точке, экранируемой коллиматором (рис. 21–23).



Рис. 20. Зависимость размера поля от угла раствора коллиматора при РИП=1300 мм



Рис. 21. Формирование полей коллиматором

Dose rate [µSv/h] 0 Entries 228394 1000 300 600 10 400 200 0 1 -200 -400 -600 -800 10 -1000 -800 -600 800 1000 -400 -200 200 400 600 0 X [mm]

Рис. 22. Утечка радиации через коллиматор при поле 100×100 мм



Рис. 23. Утечка радиации через закрытый коллиматор при поле 100×100 мм

Выводы по результатам моделирование и расчета радиационных полей сферической системы коллимации

1. Сравнение рассчитанных методом Монте-Карло в Geant4 параметров пучка позволяет сделать вывод о высокой точности данного метода.

- Проведенные расчеты показали, что предложенная система сферической коллимации пучка при использовании источника, подобного моделируемому источнику, при РИП=1000 мм способна обеспечить требуемые характеристики радиационного поля во всем диапазоне его размеров (табл. 3).
- Получены зависимости характеристик радиационного поля от основных геометрических параметров первичного и вторичного коллиматора, сферического коллиматора и триммерных створок. Предложены конфигурации параметров, обеспечивающие наилучшие характеристики поля.
- 4. Анализ распределения дозы при закрытом коллиматоре позволяет сделать вывод, что наибольшая доза обусловлена утечкой через неплотно соединенные створки коллиматора, сведенного в отрицательный угол (рис. 24). Представляется целесообразным рассмотреть уменьшение утечки с помощью зубчатой формы соприкасающихся поверхностей створок коллиматора.
- 5. Оптимизация массы коллимации не проводилась. Однако можно отметить, что за исключением области соприкосновения створок, количество материала в створках обусловливает значительную избыточность защиты, что дает возможность рассмотреть пути снижения их толщины (или замену материала с вольфрамового сплава на свинец) и, как следствие, уменьшение массы и стоимости изделия (рис. 25).
- 6. На гамме-терапевтическом аппарате В/О "Изотоп" (г. Купавна) проведены эксперименты для опытного образца разработанно-



Рис. 24. Сведение диафрагм в нулевое положение

Серия профиля	Неоднород-	Асиммет-	Полутень	Серия профиля	Неоднород-	Асиммет-	Полутень по Ү
поX	ность по л	рия по л	110 A	по У	HOCTE IIO y	рия по т	
MM	%	%	MM	MM	%	%	MM
40,00	39,22	15,49	9,00	40,00	43,84	16,98	8,00
50,00	26,13	9,96	9,00	50,00	28,78	12,42	8,00
60,00	16,82	8,60	9,00	60,00	17,67	9,91	8,00
70,00	12,12	7,49	9,00	70,00	12,67	9,39	8,00
80,00	8,87	5,75	9,00	80,00	8,39	6,45	8,00
90,00	6,12	5,50	9,00	90,00	2,44	3,05	8,00
100,00	3,58	3,62	9,00	100,00	1,42	1,39	8,00
110,00	1,11	1,24	9,00	110,00	1,33	1,56	8,00
120,00	1,15	1,60	9,00	120,00	1,29	1,62	8,00
130,00	1,17	0,99	9,00	130,00	1,06	1,36	8,00
140,00	1,13	1,17	9,00	140,00	1,19	1,42	8,00
150,00	1,35	1,19	9,00	150,00	1,41	1,37	8,00
160,00	1,16	1,31	9,00	160,00	1,30	1,40	8,00
170,00	1,17	1,15	9,00	170,00	1,36	1,47	8,00
180,00	1,32	1,18	9,00	180,00	1,54	1,33	8,00
190,00	1,36	1,32	9,00	190,00	1,23	1,19	8,00
200,00	1,34	1,49	9,00	200,00	1,37	0,99	8,00
210,00	1,41	0,99	9,00	210,00	1,51	1,18	8,00
220,00	1,45	1,16	9,00	220,00	1,38	1,24	8,00
230,00	1,49	1,10	9,00	230,00	1,48	1,09	8,00
240,00	1,70	0,96	9,00	240,00	1,54	1,23	8,00
250,00	1,68	0,93	9,00	250,00	1,66	1,30	8,00
260,00	1,75	1,16	9,00	260,00	1,76	0,94	8,00
270,00	1,81	1,00	9,00	270,00	1,72	1,06	8,00
280,00	1,91	1,04	9,00	280,00	1,95	0,77	9,00
290,00	1,99	1,00	9,00	290,00	1,95	1,00	9,00
300,00	2,02	1,02	9,50	300,00	2,07	0,94	9,00
310,00	2,28	0,91	10,00	310,00	2,10	0,97	9,00
320,00	2,25	1,06	10,00	320,00	2,07	0,87	9,00
330,00	2,32	1,33	10,00	330,00	2,19	1,05	9,00
340,00	2,31	1,21	10,00	340,00	2,33	0,84	9,00
350,00	2,33	1,30	10,00	350,00	2,35	1,10	9,00
360,00	2,53	1,09	10,00	362,00	2,33	0,95	8,00
370,00	2,56	0,99	10,00	372,00	2,61	1,03	9,00
380,00	2,51	1,00	10,00	382,00	2,60	0,98	9,00
392,00	2,59	0,83	10,00	392,00	2,57	1,31	9,00
400,00	2,69	0,83	11,00	402,00	2,63	0,71	9,00
410,00	2,78	1,01	11,00	412,00	2,73	0,87	9,00
420,00	2,87	0,98	11,00	420,00	2,79	0,87	10,00
428,00	3,11	0,82	12,00	430,00	2,92	0,75	10,00

Расчетные параметры радиационных полей

Таблица 4

Таблица З

Рассчитанные и измеренные параметры радиационных полей

	Расчетный метод				Проведенное испытание			
Серия профиля по Х	Полутень по Х	Полутень по Y	Неодно- родность	Асиммет- рия по Х	Полутень по Х	Полутень по Y	Неодно- родность	Асиммет- рия по Х
MM	MM	MM	%	%	MM	MM	MM	MM
50,00	9,00	8,00	28,78	9,96	8,6	7,6	1,9	0,18
70,00	9,00	8,00	12,67	7,49	8,7	7,5	1,2	0,12
100,00	9,00	8,00	1,42	3,62	8,7	7,6	2,2	0,10
130,00	9,00	8,00	1,06	0,99	8,8	7,8	1,9	0,13
150,00	9,00	8,00	1,41	1,19	8,9	7,7	2,6	0,62
180,00	9,00	8,00	1,54	1,18	9,0	7,8	1,9	0,26
200,00	9,00	8,00	1,37	1,49	9,1	8,0	2,9	0,84
230,00	9,00	8,00	1,48	1,10	9,2	8,1	4,1	0,40
250,00	9,00	8,00	1,66	0,93	9,2	8,2	4,2	0,47
280,00	9,00	9,00	1,95	1,04	9,4	8,2	6,0	0,54
300,00	9,50	9,00	2,07	1,02	9,4	8,2	7,1	0,62

"МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА"

2022, № 2

ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ



Рис. 25. 3-D модель системы сферической коллимации



Рис. 27. Радиационное поле 350×350 мм

го сферического коллиматора. Результаты измерений представлены на рис. 26–28. В табл. 4 приведены сравнительные данные расчетов и эксперимента для данного коллиматора.

- Проведённый расчёт системы коллимации позволяет использовать полученные результаты для конструирования радиационных головок гамма-терапевтических аппаратов без дополнительных научных исследований.
- 8. В работе представлено подробное описание использованных в Geant4 библиотек физи-



Рис. 26. Фотография профилей измеренных радиационных полей испытанной системы коллимации в г. Купавна (В/О "Изотоп").



Рис. 28. Подольный и поперечный профили радиационного поля 350×350 мм

ческих процессов, что позволяет читателю при необходимости повторить эксперимент для геометрии коллиматоров своих гамматерапевтических аппаратов.

Авторы выражают особую благодарность к.ф.-м.н. Лебедевой Жанне Сергеевне за помощь в написании данной работы, критические замечания и научное вдохновение на публикацию.

Д.И. Гранин и соавт. Расчет радиационных полей для системы сферической коллимации... 63

Список литературы

- Nucl. Instrum. and Meth. 2003. A 506. 250-303; IEEE Trans.on Nucl. Sci. 2006. 53 No. 1. 270-8.
- 2. http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/.
- 3. Penelope A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, Workshop Proceedings Issy-les-Moulineaux, France, 5-7 November 2001, AEN-NEA;
- 4. Cullen D, Hubbell JH, Kissel L. EPDL97: the Evaluated Photon Data Library, '97 version, UCRL–50400, 1997; 6(5).
- 5. Gavrila M, Relativistic K–Shell Photoeffct, Phys. Rev. 1959; 113(2).
- 6. Gavrila M, Relativistic L–Shell Photoeffct. Phys. Rev. 1961; 124(4).
- 7. Perkins ST, Cullen DE, Chen MH, et al. Tables and Graphs of Atomic Subshell and Relaxation Data Derived from the LLNL Evaluated Atomic Data Library (EADL), Z=1-100. UCRL-50400. Vol. 30.
- 8. Summary of Existing Information on the Incoherent Scattering of Photons particularly on the Validity of the Use of the Incoherent Scattering Function. Radiat. Phys. Chem. 1997; 50(1): 113-24.

- 9. Ford R, Nelson W. SLAC-210, UC-32 1978.
- 10. Tsai YS. Rev. Mod. Phys. 1974; 46: 815. Tsai YS. Rev. Mod. Phys. 1977; 49: 421.
- 11. Perkins ST, Cullen DE, Seltzer SM, Tables and Graphs of Electron-Interaction Cross-Sections from 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL), Z=1-100. UCRL-50400. Vol. 31.
- 12. Koch HW, Motz JW. Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data. Rev. Mod. Phys. 1959; 31: 920.
- 13. Urban L. A multiple scattering model, CERN-OPEN-2006-077, Dec 2006. 18 pp.
- 14. Lewis HW. Phys. Rev. 1950; 78: 526.
- 15. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. Серия технических докладов МАГАТЭ No.398, Вена, 2004.
- Гранин Д.И. Оценка мощности поглощенной дозы биологической защиты методом Монте-Карло Медицинская физика. 2020; (1): 16-7.
- 17. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

SPHERICAL COLLIMATION SYSTEMS RADIATION FIELDS MONTE CARLO CALCULATION

D.I. Granin¹, O.V. Pashkov¹, P.A. Medvedev¹, A.K.Kuppa¹, A.S. Zhemchugov² ¹ Gradiation LTD, Saint Petersburg, Russia

² Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, Dubna, Russia

<u>Purpose:</u> To determine the optimal parameters of the collimation system of the gamma therapeutic apparatus.

<u>Material and methods:</u> collimation system parameters Monte Carlo simulation in Geant4 Software Package.

<u>Results:</u> Simulation in the Geant4 software package is a reliable tool for solving such problems The good agreement between calculated and experimental data was achieved. The proposed system of spherical beam collimation using a source similar to GIK-9-3(4) (manufactured by Mayak), with a value of SSD=1000 mm, is capable of providing the required characteristics of the radiation field over the entire range of its sizes. It seems appropriate to consider the reduction of radiation leakage with the help of a jagged shape of the contacting surfaces of the collimator jaws, since the dose is mainly due to leakage through poorly connected collimator jaws, reduced to a negative angle.

<u>Conclusion</u>: The performed calculation of the collimation system makes it possible to use the obtained results for the design of radiation heads of gamma therapeutic devices without additional scientific research. The paper also provides a detailed description of the libraries of physical processes used in Geant4, which allows the reader, if necessary, to repeat the experiment for his/her own needs.

Key words: cobalt therapy, collimation system, penumbra, radiation shielding, radiation source GIK-9-3(4), Monte Carlo calculation, Geant4

E-mail: info@gradiation.ru