



## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ОПУХОЛИ И ОКРУЖАЮЩИЕ ЕЕ ТКАНЯХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МИКРОИСТОЧНИКОВ

Нерозин Н.А., Пышко А.П., Шаповалов В.В.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск, Россия)  
249033, Россия, Калужская область, Обнинск, пл. Бондаренко, 1

### Ключевые слова:

брахитерапия, микроисточники, дозиметрические характеристики, изотоп I-125, AAPM Task Group 43, расчетный код MCNP, мощность воздушной кермы

### Keywords:

brachytherapy, sources, dosimetry characteristics, the isotope I-125, AAPM Task Group 43, the calculation code MCNP, the power of the air kerma

DOI: 10.17709/2409-2231-2015-2-4-41-49



### Для корреспонденции:

Нерозин Николай Александрович – к.т.н., заместитель директора отделения физико-химических технологий – начальник научно-производственного комплекса изотопов и радиофармпрепаратов АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского»  
Адрес: 249033, Россия, Калужская область, Обнинск, пл. Бондаренко, 1  
E-mail: nerozin@ippe.ru  
Статья поступила 18.10.2015, принята к печати 20.11.2015

### For correspondence:

Nerozin Nikolay Aleksandrovich – PhD of technical sciences, Deputy director of Department of physical and chemical technologies – Head of Research and production complex of isotopes and radiopharmaceuticals JSC “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky”  
Address: Bondarenko Sq. 1, Kaluga region, Obninsk, 249033, Russia  
E-mail: nerozin@ippe.ru  
The article was received 18.10.2015, accepted for publication 20.11.2015

### Резюме

**Цель.** Проведение расчетных исследований дозиметрических характеристик микроисточников с радионуклидом I-125, опытное производство которых налажено в Научно-производственном комплексе изотопов и радиофармпрепаратов АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (ГНЦ РФ – ФЭИ). Микроисточники производства ГНЦ РФ – ФЭИ являются аналогом модели 6711 фирмы Nicomed Amersham, дозиметрические характеристики которой стандартизованы в соответствии с формализмом TG43 AAPM.

**Материалы и методы.** Микроисточник «seed № 6711» (модель фирмы Nicomed Amersham) представляет собой герметично запаянный в титановую капсулу серебряный стержень, покрытый тонким слоем радиоактивного I-125. Период полураспада йода-125 равен 59,43 суток. В процессе распада I-125 превращается в Te-125. Расчет параметров микроисточников и их сравнение со стандартной моделью 6711 проведено с использованием расчетного кода MCNP.

**Результаты.** Разработана методика расчета основных дозиметрических характеристик микроисточника ГНЦ РФ-ФЭИ в соответствии с формализмом TG43. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетных результатов, полученных по коду MCNP, который позволил выявить возможные причины различия. Сопоставлены расчетные дозовые характеристики и рекомендованные стандартные данные для дозовых характеристик микроисточника «seed № 6711».

**Выводы.** Возможны две причины различия экспериментальных и расчетных результатов. Первой из них может быть шероховатость поверхности серебряного стержня или диффузия радиоактивного йода в серебро. Второй причиной может быть различие сечений характеристического излучения серебра, используемых в коде MCNP.

В сопоставлении расчетных дозовых характеристик и рекомендованных стандартных существенное значение имеет способ нанесения активности. При соблюдении стандартных условий по составу окружающей среды, водяного фантома и воздуха с 40% влажностью, полученные результаты выходят за пределы допустимых отличий в 3% от рекомендованных данных. Тогда как вариации только толщины нанесения радиоактивного материала в диапазоне 0–10 мкм меняют дозиметрические характеристики в пределах 15–20%.

## CALCULATION STUDIES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ABSORBED DOSE RATE FOR VARIOUS SEEDS

Nerozin N.A., Pyshko A.P., Shapovalov V.V.

JSC “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky” (Obninsk, Russia)  
Bondarenko Sq. 1, Kaluga region, Obninsk, 249033, Russia

## Abstract

**Purpose.** Conducting computational studies of dosimetric characteristics of microsourses with the radionuclide I-125, pilot production of which is established in the research and production complex of isotope and radiopharmaceuticals, JSC "State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky" (SSC RF IPPE). Sources of production IPPE are similar to the model 6711 of the company Nicomed Amersham, dosimetric characteristics of which are standardized in accordance with the TG43 AAPM formalism.

**Materials and methods.** Microsource «SEED No. 6711» (model of the company Nicomed Amersham) is hermetically sealed in a titanium capsule silver rod covered with a thin layer of radioactive I-125. The half-life of iodine-125 is 59,43 days. In the process of decay of I-125 is converted into the Te-125.

Calculation of parameters of microsourses and their comparison with the standard model 6711 is carried out with use of the computer code MCNP.

**Results.** The method of calculation of the basic dosimetric characteristics of the microsource SSC RF-IPPE in accordance

with the TG43 formalism is developed. A comparative analysis of experimental data and calculated results by MCNP code, which allowed to identify possible reasons for differences, is performed. The estimated dose characteristics and recommended standard data for dose characteristics of micro «SEED No. 6711» are compared.

**Conclusions.** There are two possible reasons for the differences between experimental and calculated results. The first one may be the roughness of the surface of a silver rod or diffusion of radioactive iodine in silver. The second reason might be the difference of the cross sections of the characteristic radiation of silver used in MCNP code.

In the comparison of calculated dose characteristics and recommended standard the role of the application activity is very important. In compliance with the standard conditions on the composition of the environment, water phantom and air with 40% humidity, the results obtained are outside the acceptable difference of 3% from the recommended data. While the variation of only the thickness of the deposition of radioactive material in the 0–10 mkm change dosimetric characteristics in the range of 15–20%.

## Введение

Брахитерапия как метод имплантирования радиоактивных микроисточников в злокачественную опухоль, используется в мире со второй половины XX века. При производстве и использовании микроисточников существует ряд особенностей при тестировании и контроле, обусловленных микроскопичностью размеров микроисточника и существенным вкладом различий дозиметрических характеристик в терапевтическое воздействие. Принятый на сегодняшний день в мировой практике свод рекомендаций и правил для расчета дозиметрических характеристик впервые представлен AAPM Task Group 43 [1–3]. Также в этих документах представлены стандартные данные для основных типов микроисточников.

Следуя рекомендациям Task Group 43, в расчетном коде MCNP [4–7] были проведены расчетные исследования дозиметрических характеристик микроисточников с радионуклидом I-125 — стандартных и разрабатываемых в ГНЦ РФ-ФЭИ. Получены стандартные дозиметри-

ческие данные, характеризующие исследуемые типы микроисточников.

## Материалы и методы

В брахитерапии наиболее хорошо известны и часто применяются микроисточники с йодом-125. На рисунке 1 представлен стандартный микроисточник с этим радионуклидом, взятый за эталон в мировой практике.

Микроисточник «seed № 6711» (модель фирмы Nicomed Amersham) [1, 2] представляет собой герметично запаянный в титановую капсулу серебряный стержень, покрытый тонким слоем радиоактивного I-125. Период полураспада йода-125 равен 59,43 суток. В процессе распада I-125 превращается в Te-125 в первом возбужденном состоянии. Переход Te-125 в стабильное состояние с вероятностью 93% происходит с испусканием электронов внутренней конверсии, либо, с вероятностью 7%, с испусканием гамма излучения с энергией 35,5 кэВ. Захват и внутренняя конверсия электронов со-

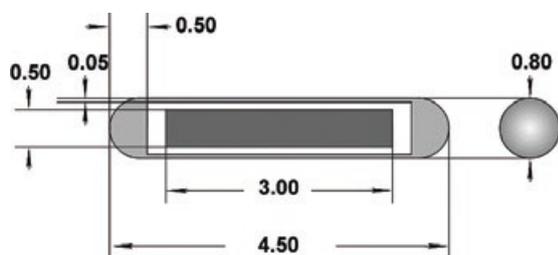


Рисунок 1. Габариты стандартного микроисточника, мм, «SEED № 6711» - модель фирмы Nicomed Amersham  
Figure 1. The dimensions of a standard microsource, mm, «SEED No. 6711» model of the company Nicomed Amersham

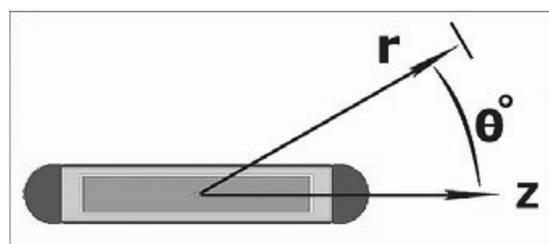


Рисунок 2. Сечение в плоскости, проходящей через ось симметрии микроисточника  
Figure 2. The cross-section in a plane passing through the axis of symmetry of the microsource

проводятся характеристическим излучением. Имеется также флуоресцентное рентгеновское излучение с энергией 22,1 и 25,5 кэВ вследствие взаимодействия фотонов йода-125 с серебряным стержнем. Электроны и фотоны предельно низких энергий спектра радиоактивного йода поглощаются титановыми стенками капсулы.

В большинстве случаев пациент носит имплантированные микроисточники всю жизнь, поэтому существуют определенные требования к материалам, используемым в их конструкции. Серебряный и свинцовый маркер необходимы для визуальной оценки расположения микроисточников в опухоли на рентгеновских снимках. Титановая оболочка МИ нейтральна к химическим реакциям внутри тела.

Фотоны низких энергий позволяют локализовать терапевтическое воздействие в пределах области введения микроисточника, практически не затрагивая окружающие здоровые ткани. С другой стороны, из-за неравномерности толщины титановой оболочки и особенностей конструкции излучаемой поверхности дозовое поле вокруг микроисточника имеет выраженную зависимость от направления. Так, запаянные торцы капсулы значительно ослабляют низкоэнергетическое излучение, и, напротив, основной нанесенной на стержень части активности противостоит достаточно тонкий слой титановой трубки капсулы. Следовательно, для оптимизации дозового воздействия на опухолевую ткань необходимо знать характер изменения значения мощности поглощенной дозы по глубине вокруг микроисточ-

ника в плоскости, проходящей по оси вращения (рис. 2).

Ранее для расчета дозовых характеристик использовалась аппроксимация точечного источника в вакууме, которая не могла достоверно воспроизводить как рассеяние в ткани тела, так и искривление дозовых полей конструкционными материалами источника. В этой связи, а также учитывая, что в медицине эффект недоблучения является даже более критичным, чем переоблучения, необходимо точное знание и планирование дозовых характеристик для оптимального и безопасного применения, а, следовательно, иные принципы и формализм расчета.

Исторически задачу выработки норм в оценке дозовых характеристик для разработки микроисточников каждый производитель решал отдельно, тем самым умножая неопределенность в описании предмета. Поэтому в США для стандартизации дозовых характеристик «SEED № 6711» и других терапевтических микроисточников была инициирована и проведена работа по анализу и систематизации существующих публикаций, посвященных радиационной терапии. В 1988 г. Комитетом Радиационной Терапии Американской Ассоциации Физиков в Медицине была сформирована Рабочая группа № 43 (TG43) для курирования этой проблемы. Итогом работы является формализм описания дозиметрических характеристик микроисточников, опубликованный в отчете «Дозиметрия внедренных брахитерапевтических источников». Отчет представлен в журнале «Медицинская физика» (США) в феврале 1995 г. [3].

Таблица 1. Выход фотонов по энергетическим линиям микроисточника [2, 3]

Table 1. The output of the photons on the energy lines of the microsource [2, 3]

I-125 ( $T_{1/2} = 59.4060.01$ суток)	
Энергия фотонов (кэВ)	Выход фотонов
27,202	0,406
27,472	0,757
30,98	0,202
31,71	0,0439
35,492	0,0668

Таблица 2. Массовый состав воздуха и воды, использующийся в расчете моделей микроисточников [1–3]

Table 2. The mass composition of air and water used in the calculation models of the microsources [1–3]

Воздух (относительная влажность 40%)		Вода (чистая, дегазированная)	
Элемент	% вес.	Элемент	% вес.
Водород	0,0732	Водород	11,1898
Углерод	0,0123	Кислород	88,8102
Азот	75,0325		
Кислород	23,6077		
Аргон	1,2743		

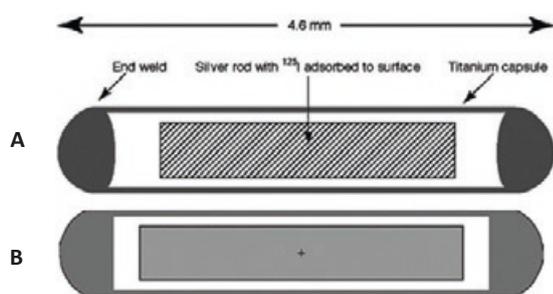


Рисунок 3. Сравнение изображений и описаний моделей микроисточников: А – «Amersham model 6711 source»; В – воспроизведенная по описанию модель

Figure 3. Compare of images and descriptions of models of microsources: A – «Amersham model 6711 source»; B – model reproduced according to the description

Отличие предложенного в США формализма от методов, оперирующих с дозой и коэффициентами ослабления материала, состоит в получении значения мощности поглощенной дозы, основываясь на данных конкретного микроисточника в тканеэквивалентном фантоме. Этот формализм предполагает использование расчетных данных для определенного типа микроисточников с учетом геометрических особенностей конструкции и рассеивания в среде, эквивалентной телу. Для этого необходима следующая дозиметрическая информация, характеризующая микроисточник как точечный анизотропный источник излучения:

*Мощность воздушной кермы,  $S_k$* , — значение мощности поглощенной дозы для воздушной кермы, полу-

ченной в вакууме на расстоянии достаточном, чтобы микроисточник представлялся точечным (обычно более 10 см). Единица мощности воздушной кермы равна:

$$1 \text{ U} = 1 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \text{ h}^{-1} = 1 \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2 \text{ h}^{-1}.$$

*Константа мощности дозы,  $\Lambda$* , определена как мощность дозы в единицах воздушной кермы на 1 см по поперечной оси источника.

*Радиальная функция дозы,  $g(r)$  и  $g(l)$* , описывает радиальную зависимость дозы на поперечной оси, обусловленную поглощением фотонов и рассеянием в среде.

*Функция анизотропии,  $F(r, q)$* , описывает изменение дозы вокруг источника брахитерапии, обусловленное самопоглощением и наклонной фильтрацией излучения в материале капсулы.

*Коэффициент анизотропии,  $\Phi(r)$* , определен как отношение усредненной по мощности дозы на данном радиальном расстоянии к мощности дозы на том же самом расстоянии на поперечной оси.

*Средняя константа анизотропии,  $\Phi$* , рассчитана посредством усреднения индивидуальных коэффициентов анизотропии в данной среде с использованием в качестве взвешивающего фактора обратного квадрата расстояния.

Для получения опыта расчетного сопровождения подготавливаемых к промышленному производству новых брахитерапевтических микроисточников в расчетном коде MCNP были оценены дозиметрические характеристики стандартных микроисточников по методологии, представленной в TG43 [1–3].

Необходимые для дозиметрических характеристик значения поглощенной дозы в различных средах получены с использованием локальной оценки ( $f_5$ ) потока фото-

Таблица 3. Значения вклада фотонов различных энергетических диапазонов. Нормировано относительно диапазона излучения I-125 (26...37 кэВ).

Table 3. The value of contributions of photons of different energy ranges. Normalized relative range of radiation of I-125 (26...37 keV)

Экспериментальные данные							
Диапазон энергий (кэВ)	21–36	21–26,5	26,5–36	35,49	31,7	30,98	27,38
Количество импульсов	1,598	0,592	1	0,024	0,026	0,111	0,808
Расчетные данные MCNP							
Диапазон энергий (кэВ)	21–37	21–26	26–37	34–37	31,4–33	29,5–31,4	26–29,5
Активность нанесена на серебряный стержень							
$f_5$	1,28	0,28	1	0,03	0,024	0,125	0,82
$f_8$	1,278	0,278	1	0,031	0,026	0,128	0,816
Активность «заглублена» в стержень из Ag							
$f_5$	1,568	0,568	1	0,034	0,026	0,132	0,809
$f_8$	1,561	0,561	1	0,035	0,026	0,134	0,804

Примечание:  $f_5$  является локальной оценкой поглощенной дозы в точке,  $f_8$  – оценка поглощенной энергии по балансу входящих и исходящих энергий частиц в объеме.

Note:  $f_5$  is a local estimate of the absorbed dose at the point,  $f_8$  – evaluation of the absorbed energy by the balance of incoming and outgoing energies of the particles in the volume.

нов с учетом керма-факторов. Состав воздуха и воды брался стандартным, рекомендуемым для расчетов (табл. 2).

Керма-факторы для фотонов в воздухе и воде рассчитывались по данным NIST для элементов с учетом процентного содержания этих элементов в составе среды.

При создании расчетных моделей стандартных микроисточников были использованы открытые данные о конструктивных особенностях и материалах, используемых в изготовлении. На рисунке 3 представлены сопоставления изображений, полученных из доступных источников [1–3], и сечений моделей, используемых в расчете по программному коду MCNP [4–6], составленные на основе описаний в документациях.

### Результаты исследования

В определении толщины и состава покрытия подложки для «Amersham model 6711 source» существует неопределенность, приведшая к большому объему расчетов с различными вариантами нанесения активности.

В качестве параметрических расчетов проведены исследования влияния вариантов пространственного расположения радиоактивного покрытия на поглощение и модуляции низкоэнергетического излучения. Сравнивались данные, полученные при экспериментальном измерении испускаемых микроисточником фотонов I-125, и расчетные данные, полученные по коду MCNP.

На микроисточнике № 7 (аналог SEED #6711, разрабатываемый в ГНЦ РФ-ФЭИ) регистрировалось количество импульсов в энергетических каналах детектора «БДЕР-КИ-11 К 2300007». Активность I-125 в эксперименте составляла 1.0 мКи (37,11 МБк).

Для сравнения с экспериментальными результатами по коду MCNP были выполнены расчеты поглощенной дозы в кремнии для одиночного микроисточника в воздухе. Толщина кремниевого детектора принималась равной 0,14 мм, расстояние от микроисточника — 10 см.

Рассмотрен вариант с нанесением йодной активности на поверхность стержня, а также вариант заглибление активности в стержень, моделирующий диффузию йода в серебро.

Регистрация энерговыделения в детекторе и потока фотонов на входе в детектор производилась с разбивкой на энергетические диапазоны.

Результаты эксперимента и расчета приведены в таблице 3. Данные таблицы 3 нормированы на значения поглощенной дозы или потока фотонов в энергетическом интервале, включающем в себя линии радиоактивного йода (26–37 кэВ). Такая нормировка обусловлена тем, что в экспериментальных данных отсутствует информация об абсолютной активности I-125.

Максимальные отличия экспериментальных и расчетных данных наблюдаются для диапазона энергий, соответствующих характеристическому излучению серебра (21–26 кэВ), для расчетной модели с нанесением активности на поверхность серебряного стержня. Наиболее близким к эксперименту оказался вариант расчета, в котором активность йода-125 была «заглиблена» в серебряный стержень.

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетных результатов, полученных

по коду MCNP, позволил выявить две возможные причины различия. Первой из них может быть шероховатость поверхности серебряного стержня или диффузия радиоактивного йода в серебро. Второй причиной может быть различие сечений характеристического излучения серебра, используемых в коде MCNP.

В сопоставлении расчетных дозовых характеристик и рекомендованных стандартных данных для дозовых характеристик микроисточника «Amersham model 6711 source» была показана роль способа нанесения активности.

В процессе работы поглощенная доза гамма-излучения, полученная при расчете, обрабатывалась в соответствии с нижеследующими математическими зависимостями и сопоставлялась со справочными данными для стандартных микроисточников.

Нормировочные распределения деградации дозы по глубине в одномерной модели (функция  $G_p(r, \theta)$ ) и двумерной модели с учетом линейной протяженности источника излучения (функция  $G_L(r, \theta)$ ) рассчитывались по формулам:

$$G_p(r, \theta) = r^{-2} \tag{1}$$

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{Lr \sin \theta} & \text{if } \theta \neq 0^\circ \\ (r^2 - L^2 / 4)^{-1} & \text{if } \theta = 0^\circ \end{cases} \tag{2}$$

где  $\theta$  — угол между лучом, проведенным от центра микроисточника к точке детектирования, и осью микроисточника,

$\beta$  — угол в радианах с вершиной в точке детектирования, охватывающий концы линейного источника приведенной длины,  $L, r$  — расстояние между центром микроисточника и точкой детектирования.

Дозиметрические характеристики радиальной функции дозы и функции анизотропии рассчитывались по формулам:

$$g_x(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0) G_x(r_0, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0) G_x(r, \theta_0)} \tag{3}$$

$$F(r, \theta) = \frac{\dot{D}(r, \theta) G_L(r, \theta)}{\dot{D}(r, \theta_0) G_L(r, \theta_0)} \tag{4}$$

Индекс  $X$  в функции  $G_x(r, \theta)$  означает:  $P$  — точечная аппроксимация,  $L$  — линейная аппроксимация микроисточника.  $\dot{D}(r, \theta)$  — полученная по коду MCNP мощность поглощенной дозы в водяном фантоме радиусом 15 см.

Также были рассчитаны мощность воздушной кермы —  $S_k$  и постоянная дозы  $\Lambda$  по формулам:

$$S_k = \dot{K}_\delta(d)d^2 \tag{5}$$

$$\Lambda = \frac{\dot{D}(r_0, \theta_0)}{S_k} \tag{6}$$

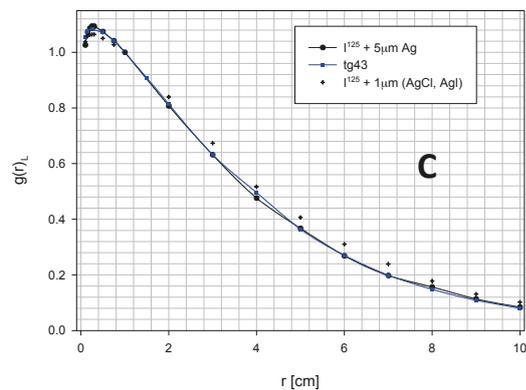
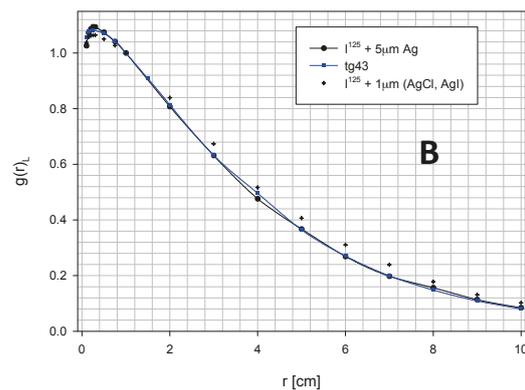
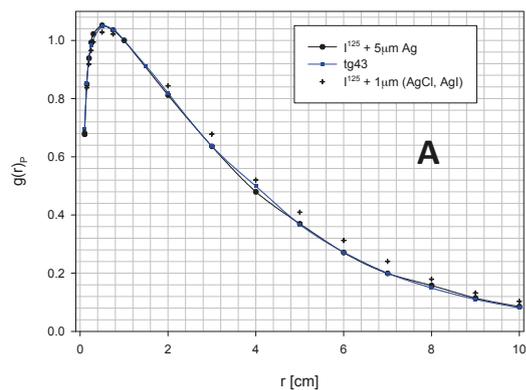
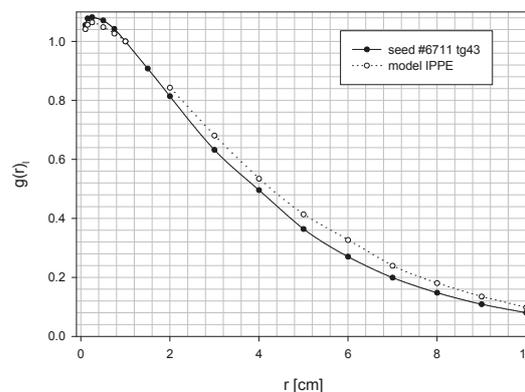
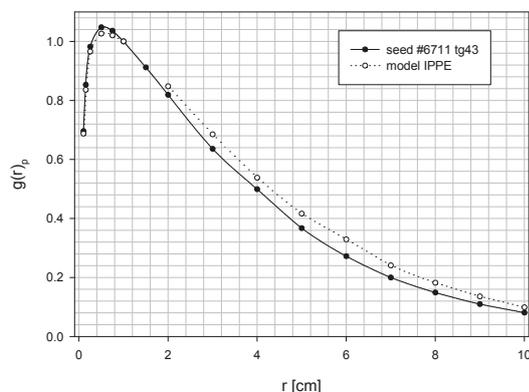


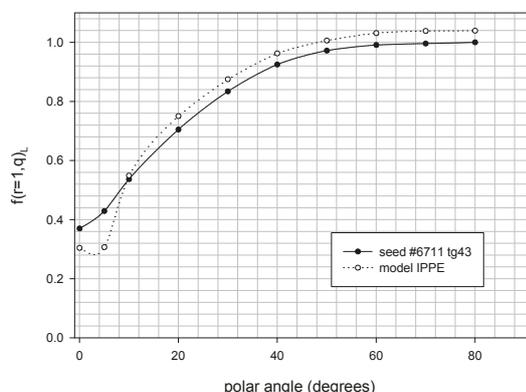
Рисунок 4. Отличия в дозиметрических характеристиках «Amersham model 6711 source» для данных, приведенных в [2] и рассчитанных по воспроизведенным моделям в коде MCNP. А – радиальная функция дозы для точечной аппроксимации, В – радиальная функция дозы для линейной аппроксимации, С – функция анизотропии на радиусе 1 см

Figure 4. The differences in the dosimetric characteristics of «Amersham model 6711 source» for the data given in [2] and calculated according to the models reproduced in the code MCNP. A – radial dose function for a point approximation, B – radial dose function for the linear approximation, C – is a function of the anisotropy at a radius of 1 cm.



А – Точечная аппроксимация, радиальная доза  
A – Point approximation, radial dose

В – Линейная аппроксимация, радиальная доза  
B – Linear approximation, radial dose



С – Линейная аппроксимация, функция анизотропии  
C – Linear approximation, function anisotropy

Рисунок 6. Дозиметрические характеристики производимого в ГНЦ РФ-ФЭИ микроисточника, рассчитанные по воспроизведенной модели в коде MCNP в сравнении с данными для «Amersham model 6711 source», приведенными в [2], и А – радиальная функция дозы для точечной аппроксимации, В – радиальная функция дозы для линейной аппроксимации, С – функция анизотропии на радиусе 1 см

Figure 6. Dosimetric characteristics of the microsource produced in SSC RF IPPE, calculated according to the model reproduced in the code MCNP in comparison with the data for «Amersham model 6711 source», is given in [2], and A – radial dose function for a point approximation, B – radial dose function for the linear approximation, C is a function of the anisotropy at a radius of 1 cm

Таблица 4. Значения  $F(r, \theta)$   
Table 4. Values of  $F(r, \theta)$

Угол $\theta$ (градусы)	r [cm]									
	0.3	0.5	0.7	1	2	3	4	5	6	7
0	0.154	0.202	0.248	0.304	0.419	0.484	0.550	0.580	0.622	0.636
5	0.219	0.203	0.250	0.307	0.421	0.637	0.559	0.589	0.632	0.643
10	0.398	0.454	0.501	0.549	0.628	0.675	0.728	0.726	0.747	0.724
15	0.608	0.597	0.630	0.660	0.723	0.737	0.783	0.781	0.821	0.793
20	0.782	0.728	0.737	0.750	0.781	0.809	0.828	0.828	0.831	0.877
25	0.881	0.811	0.815	0.818	0.841	0.854	0.881	0.860	0.912	0.884
30	0.939	0.887	0.878	0.875	0.884	0.889	0.905	0.904	0.907	0.898
35	0.973	0.939	0.940	0.921	0.915	0.923	0.926	0.934	0.950	0.900
40	1.001	0.965	0.963	0.963	0.945	0.938	0.962	0.954	0.971	0.971
45	1.012	0.991	0.989	0.982	0.969	0.959	0.981	0.990	0.982	0.996
50	1.028	1.006	1.007	1.006	0.987	0.981	0.999	1.011	1.001	1.009
55	1.048	1.022	1.024	1.020	1.003	0.991	1.003	1.014	1.015	0.980
60	0.968	1.027	1.033	1.031	1.031	1.000	1.019	1.017	1.032	1.000
65	0.971	1.042	1.049	1.036	1.020	1.008	1.017	1.014	1.064	1.025
70	0.982	1.041	1.050	1.039	1.026	1.029	1.016	1.036	1.036	1.023
75	0.985	0.987	1.046	1.048	1.034	1.012	1.028	1.027	1.016	1.002
80	0.988	0.996	0.998	1.039	1.030	1.012	1.028	1.027	1.063	1.028
85	0.997	1.008	1.008	1.009	1.008	1.034	1.011	1.019	1.016	1.010
90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Phi_{an}(r)$	<b>1.054</b>	<b>0.994</b>	<b>0.986</b>	<b>0.980</b>	<b>0.970</b>	<b>0.967</b>	<b>0.977</b>	<b>0.980</b>	<b>0.991</b>	<b>0.975</b>

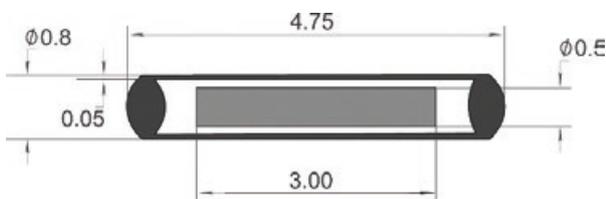


Рисунок 5. Микроисточник ГНЦ РФ-ФЭИ  
Figure 5. Microsource of SSC RF IPPE

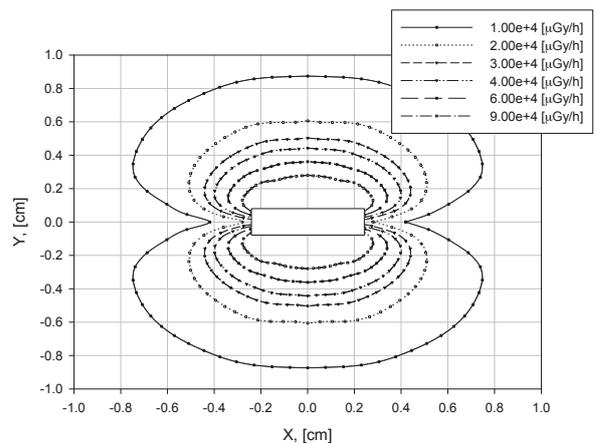


Рисунок 7. Изолинии мощности поглощенной дозы в воде от разрабатываемого в ГНЦ РФ-ФЭИ микроисточника  
Figure 7. Contour lines of absorbed dose rate in water from the microsource developed in SSC RF IPPE

где  $K_0$  — поглощенная доза для воздуха, рассчитанная в вакууме с исключением фотонов с энергиями ниже 0.005 KeV.

В отчете приведены два варианта расположения активности на серебряном сердечнике: вариант покрытия активного йода слоем серебра толщиной 5 мкм и вариант покрытия материалом, содержащим одну долю AgCl и две доли AgI толщиной 1 мкм. В обоих вариантах слой I-125 брался толщиной 0,1 мкм (рис. 4).

Как видно из рисунка 4, при покрытии радиоактивного материала сверху слоем серебра толщиной 5 мкм достигается полное согласие в значениях радиальной функции дозы со стандартом, однако согласие в функции анизотропии на углах, соответствующих торцам микроисточника, существенно уменьшается.

С учетом полученного опыта были рассчитаны подробные данные о дозиметрических характеристиках микроисточника с радиоактивным йодом, разрабатываемого в ГНЦ РФ-ФЗИ (рис. 5).

Толщина слоя нанесенной активности производимо в ГНЦ РФ-ФЗИ микроисточника, согласно заявлениям разработчика, составила 8,0 10–3 мкм или 80 Å слоя материала AgI, соответствующего значению нанесенной активности в 1 мКи. Для данных условий были рассчитаны дозиметрические характеристики (рис. 6).

В таблице 4 представлены данные по функции анизотропии на различных радиусах.

На рисунке 7 представлены линии уровня мощности поглощенной дозы (изодозы) в воде от одиночного микроисточника. Результаты нормированы на нанесенную активность, равную 1 мКи.

В таблице 5. представлена постоянная дозы  $\Lambda$  для исследованных микроисточников.

Показательны также отличия в спектре выходящих фотонов из микроисточника от экспериментальных данных (табл. 6).

Основным вкладом в характеристическое излучение серебра стали энергетические линии с максимальной долей выхода фотонов 27,202 кэВ и 27,473 кэВ. Особенно это выражено для экспериментальных данных, что позволяет сделать предположение о более вероятном, в данном случае, взаимодействии излучения с серебром или серебросодержащим материалом, т. е. явное наличие подобного верхнего нерадиоактивного закрепляющего слоя на подложке стандартного микроисточника.

### Заключение

Проведены исследования дозиметрических характеристик стандартных микроисточников. Расчеты выполнены средствами кода MCNP в соответствии с рекомен-

Таблица 5. Постоянная дозы  $\Lambda$  для исследуемых микроисточников  
Table 5. Dose constant  $\Lambda$  for the studied microsources

Источник	$\Lambda$ – TG-43(1995)	$\Lambda$ – Revised Dose-Rate Constants (2004)	$\Lambda$ – MCNP model
Model 6711	0.88	0.964	0.941 ( $^{125}\text{I} + 5\text{mkm Ag}$ ). 0.994 ( $^{125}\text{I} + 1\text{mkm (AgCl, AgI)}$ )
Model 200	0.74	0.686	0.787
Модель ГНЦ РФ-ФЗИ			1.01

Таблица 6. Относительный спектр фотонов, выходящих из микроисточника «model 6711», на оси, перпендикулярной оси микроисточника, в зависимости от материала покрытия слоя I-125 в сравнении с данными NIST [8]

Table 6. Relative spectrum of photons emerging from the microsource «model 6711», on the axis perpendicular to the axis of the microsource, depending on the material of the coating layer I-125 in comparison with the data of NIST [8]

	Энергия, кэВ	Источник	$^{125}\text{I} + 5 \text{ мкм Ag}$	$^{125}\text{I} + 1 \text{ мкм (AgCl, AgI)}$	Модель ГНЦ РФ-ФЗИ (80Å AgI)	NIST [8]
Ag K x-лучи	21.99		8.89E-02	5.40E-02	5.02E-02	4.82E-02
	22.163		1.65E-01	9.91E-02	9.17E-02	1.03E-01
	24.94		5.22E-02	3.15E-02	2.92E-02	3.45E-02
	25.46		9.68E-03	5.99E-03	5.59E-03	8.90E-03
Излучение $^{125}\text{I}$	27.202	2.75E-01	1.78E-01	2.19E-01	2.23E-01	2.09E-01
	27.473	5.13E-01	3.36E-01	4.07E-01	4.15E-01	4.01E-01
	30.98	1.37E-01	1.06E-01	1.17E-01	1.18E-01	1.25E-01
	31.7	2.97E-02	2.35E-02	2.57E-02	2.58E-02	2.80E-02
	35.49	4.53E-02	4.07E-02	4.06E-02	4.12E-02	4.19E-02

дациями Task Group 43. Выявлен основной, значимый момент в описании расчетной модели микроисточника, влияющий на характер изменения дозовых полей — способ нанесения радиоактивного материала.

Показано, что, при соблюдении стандартных условий по составу окружающей среды, водяного фантома и воздуха с 40% влажностью, полученные результаты выходят за пределы допустимых отличий в 3% от рекомендован-

ных данных. Тогда как вариации только толщины нанесения радиоактивного материала в диапазоне 0–10 мкм меняют дозиметрические характеристики в пределах 15–20%.

По отработанной методике рассчитаны основные дозиметрические характеристики микроисточника ГНЦ РФ-ФЗИ.

#### Список литературы/References

1. Williamson J. F. Update of AAPM Task Group No. 43 Report. A Revised AAPM Protocol for Interstitial Brachytherapy Dose Calculations. Overview. AAPM — 45th annual meeting. 2003.
2. Rivard M. J., Coursey B. M., DeWerd L. A., Hanson W. F., Saiful Huq M., Ibbott G. S., Mitch M. G., Nath R., Williamson J. F. Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. *Med Phys.* 2004; 31 (3): 633–674.
3. Nath R., Anderson L. L., Luxton G., Weaver K. A., Williamson J. F., Meigooni A. S. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. *American Association of Physicists in Medicine. Med Phys.* 1995; 22 (2): 209–233.
4. Briesmeister J. F. (Ed). MCNP4A — A General Monte Carlo N — Particle Transport code. Los Alamos National Laboratory report. LA-12625-M; 1993.
5. Forrest B. B., Booth T. E., et al. MCNP-A General Monte Carlo N — Particle Transport code, Version 5, Overview and Theory, Volume I/LA-UR-03–1987, LANL, 2003.
6. Briesmeister J. F., Brown J. S., et al. MCNP-A General Monte Carlo N — Particle Transport code, Version 5, User's Guide, Volume II, LA-CP-03–0245, LANL, 2003.
7. Hodgdon A. D. A Variance Reduction Management Algorithm for MCNP. *Trans Ann Nucl Soc.* 2002; 28: 373.
8. Seltzer S. M., Lamperti P. J., Loevinger R., Mitch M. G., Weaver J. T., Coursey B. M. New National Air-Kerma-Strength Standards for <sup>125</sup>I and <sup>103</sup>Pd Brachytherapy Seeds. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology.* 2003; 108 (5): 337–358.

#### Информация об авторах:

1. Нерозин Николай Александрович — к.т.н., заместитель директора отделения физико-химических технологий — начальник научно-производственного комплекса изотопов и радиофармпрепаратов АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»
2. Пышко Александр Павлович — к.ф.-м.н., начальник отдела инженерно-физических исследований фундаментальных и прикладных проблем специальных ЯЭУ, отделение космических энергосистем АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»
3. Шаповалов Владимир Владимирович — к.х.н., главный технолог научно-производственного комплекса изотопов и радиофармпрепаратов, отделение физико-химических технологий АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»

#### Information about authors:

1. Nerozin Nikolay Aleksandrovich — PhD of technical sciences, Deputy director of Department of physical and chemical technologies — Head of Research and production complex of isotopes and radiopharmaceuticals JSC “State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky”
2. Pyshko Alexander Pavlovich — PhD of physics and mathematics, Head of Division of engineering and physical studies of fundamental and applied problems of special nuclear power facilities, Department of space power systems JSC “State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky”
3. Shapovalov Vladimir Vladimirovich — PhD of chemistry, Chief Technologist of Research and production complex of isotopes and radiopharmaceuticals, Department of physical and chemical technologies JSC “State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky”

#### Оформление ссылки для цитирования статьи:

Нерозин Н. А., Пышко А. П., Шаповалов В. В. Расчетные исследования пространственного распределения мощности поглощенной дозы в опухоли и окружающие ее тканях для различных микроисточников. *Исследования и практика в медицине.* 2015; 2 (4): 41–49. DOI: 10.17709/2409–2231–2015–2-4-41-49

Nerozin N. A., Pyshko A. P., Shapovalov V. V. Calculation studies of spatial distribution of the absorbed dose rate for various seeds. *Issled. prakt. Med.* 2015; 2 (4): 41–49. DOI: 10.17709/2409–2231–2015–2-4-41-49

Конфликт интересов. Все авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.  
Conflict of interest. All authors report no conflict of interest.