

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ МЕТОДОМ СОВМЕЩЕНИЯ НАТУРНОГО И ВИРТУАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**И.Л. Данилов, кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Даны представления об основных физических характеристиках ионизирующих излучений и их единицах измерения. Приведены примеры обучения работе с источниками ионизирующих излучений методом совмещения натурального и виртуального эксперимента. Рассмотрен порядок расчета активности радиоактивного препарата, мощности дозы ионизирующего излучения, коэффициентов ослабления гамма-излучения веществом для различных материалов.

Ключевые слова: характеристики ионизирующих излучений, единицы измерения характеристик ионизирующих излучений, натуральный и виртуальный эксперимент

STUDY OF THE BASIC PHYSICAL CHARACTERISTICS OF IONIZING RADIATIONS BY THE METHOD OF COMBINATION REAL AND VIRTUAL EXPERIMENTS

I.L. Danilov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

There are considered the basic physical characteristics of the ionizing radiation; examples of the training to work with sources of ionizing radiation by the method of combining of the real and virtual experiments; the order of calculation of activity of a radioactive drug, dose ionizing radiation and coefficients of attenuation of gamma radiation with matter.

Keywords: characteristics of ionizing radiation, units of measure of characteristics of ionizing radiation, real and virtual experiment

Обучение основам радиационной безопасности в технических вузах, средних учебных заведениях, организациях МЧС России и других ведомств, связанных с эксплуатацией или контролированием работы организаций и предприятий, в которых используются радиоактивные вещества, требует к себе постоянного внимания и совершенствования обучающих методик [1–3].

Очевидным доводом в пользу этого факта служат практически все аварийные ситуации в области атомной энергетики (от Чернобыля до Фукусимы), когда незнание и непонимание факторов воздействия ионизирующих излучений и способов защиты от них приводило к трагическим последствиям не только для персонала АЭС, но и для людей, проживающих в ближайших окрестностях.

В статье сделана попытка систематизировать основные характеристики ионизирующих излучений (ИИ) и их единицы измерения (как системные, так и внесистемные), а затем рассмотреть натурные и виртуальные эксперименты, которые позволят легко понять особенности работы с источниками ИИ, способами расчета некоторых их характеристик и методами защиты от негативного воздействия ИИ.

Физические характеристики ИИ

Активность (A) радиоактивного препарата – это число распадов ядер атомов данного радиоактивного вещества, происходящих за единицу времени. Единицей измерения активности в системе СИ является один распад в секунду, которая называется один Беккерель (1 Бк):

$$[A] = 1 \text{ распад/сек} = 1 \text{ Бк.}$$

Достаточно часто в литературе используется внесистемная единица измерения активности – один Кюри (1 Ки), которая соответствует числу распадов ядер атомов радия в одном его грамме за одну секунду:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Для сравнения активности разных масс радиоактивных веществ вводится физическая величина – удельная активность ($A_{уд}$) – это активность единицы массы вещества.

Удельная активность измеряется в беккерелях на килограмм: $[A_{уд}] = 1 \text{ Бк/кг}$.

Радиоактивный распад ядер атомов всегда сопровождается испусканием каких-либо частиц – альфа-частиц (ядер гелия), протонов, электронов, позитронов или гамма-квантов. Эти частицы, попадая в вещество (например, в тело человека), вызывают ионизацию молекул данного вещества. Поэтому, потоки частиц такого рода называют ионизирующим излучением. Превращение нейтральных атомов и молекул в заряженные частицы (ионизация) изменяет протекание всех биохимических процессов в живом организме и может привести к его гибели.

Основными физическими характеристиками ИИ являются следующие.

Поглощенная доза ИИ ($D_{пол}$) – это количество энергии, поглощенное единицей массы вещества. Единицей измерения поглощенной дозы является один Джоуль на один килограмм и называется один Грей: $[D_{пол}] = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр}$.

Эквивалентная поглощенная доза ИИ ($D_{экв}$) – учитывает разную эффективность различных видов излучений с точки зрения ионизирующего воздействия на биологические ткани:

$$D_{экв} = k \cdot D_{пол},$$

где k – коэффициент качества излучения.

Для альфа-частиц $k=20$, для бета-излучений (электроны, позитроны) $k=1$, для нейтронов $k=3-7$ в зависимости от их скорости. Единицей измерения эквивалентной поглощенной дозы является также один Джоуль на один килограмм, но называется она один Зиверт: $[D_{экв}] = \text{Дж/кг} = 1 \text{ Зв}$.

Эффективная эквивалентная поглощенная доза ИИ ($D_{эфф}$) – учитывает разную чувствительность к радиации различных органов человека. Весь организм разбивается на характерные зоны воздействия, каждой из которых присваивается свой коэффициент чувствительности n_i . Сумма всех таких коэффициентов равна единице ($\sum n_i = 1$) – весь организм:

$$D_{эфф} = \sum n_i \cdot D_{эфф i}.$$

Например, значение коэффициента радиационного риска n_i для отдельных органов равно [4]: гонады (половые железы) – 0,2; красный костный мозг – 0,12; толстый кишечник – 0,12; желудок – 0,12; легкие – 0,12; мочевой пузырь – 0,05; печень – 0,05; пищевод – 0,05; щитовидная железа – 0,05; кожа – 0,01; клетки костных поверхностей – 0,01; головной мозг – 0,025; остальные ткани – 0,05.

Экспозиционная доза ИИ ($D_{эксн}$) – характеризует степень ионизации воздуха при воздействии ИИ и определяется отношением величины электрического заряда (q), появившегося в веществе в результате этого воздействия, к массе вещества (m): $D_{эксн} = q/m$.

Единицей измерения экспозиционной дозы в системе СИ является один Кулон на килограмм: $[D_{эксн}] = 1 \text{ Кл/кг}$.

Внесистемной единицей измерения этой величины является один Рентген (1 Р), что соответствует появлению при нормальных условиях в 1 см^3 воздуха электрического заряда в 1 СГС (сантиметр-грамм-секунда) единицу заряда (примерно $3,3 \cdot 10^{-10}$ Кл). Система единиц измерения СГС сегодня применяется редко. После несложных преобразований получим, что $1 \text{ Р} \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Измерение экспозиционной дозы в рентгенах обычно производится для гамма-излучения или рентгеновского излучения при энергиях квантов излучения менее 3 МэВ (мега электрон-вольт: $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$).

В ядерной физике внесистемные единицы измерения до сих пор используются достаточно часто. Поэтому приведем следующие соотношения:

- $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ ($1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/грамм}$ – система СГС);
- $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$ или $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ (бэр – биологический эквивалент рентгена).

При воздействии ИИ на живые организмы очень важно знать время, в течение которого была получена та или иная доза. Такой временной характеристикой каждой дозы является мощность дозы.

Мощность дозы – это величина, равная отношению соответствующей дозы ко времени, за которое доза была получена.

Значит, в системе СИ для мощностей доз имеем единицы измерения 1 Гр/с , 1 Зв/с , $1 \text{ Кл/(кг}\cdot\text{с)}$. Однако в отраслевых и государственных стандартах предельно допустимые дозы (ПДД) и их мощности чаще приводят в расчете на один год.

Влияние ИИ на организм человека и защита от ИИ

Если произошло облучение человека, то чем за большее время получена доза ИИ, тем менее опасно это для здоровья. Живой организм способен к самозалечиванию любых небольших ран, в том числе и связанных с облучением. Говоря иными словами, получение нескольких неглубоких порезов с большими временными перерывами менее опасно, чем однократный сильный проникающий удар.

Низкий уровень развития легкой формы лучевой болезни возникает при эквивалентной дозе облучения приблизительно 1 Зв, тяжелая форма лучевой болезни, при которой погибает половина всех облученных, наступает при эквивалентной дозе облучения 4,5 Зв. Стопроцентный смертельный исход лучевой болезни соответствует эквивалентной дозе облучения 5,5–7,0 Зв [4, 5].

В настоящее время разработан ряд химических препаратов (протекторов), существенно снижающих негативный эффект воздействия ионизирующего излучения на организм человека [6, 7].

В России предельно допустимые уровни ионизирующего облучения и принципы радиационной безопасности регламентируются «Нормами радиационной безопасности» НРБ-99/2009, «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» ОСП72-87. В соответствии с этими нормативными документами нормы облучения установлены для следующих трех категорий лиц (табл. 1):

– категория А – персонал, постоянно или временно работающий с источниками ионизирующих излучений;

– категория Б – ограниченная часть населения, которая по условиям размещения рабочих мест или по условиям проживания может подвергаться воздействию источников излучения;

– категория В – население страны, республики, края и области.

Таблица 1. Основные значения ПДД ИИ облучений

Группа критических органов	Органы и ткани человеческого организма	ПДД для категории А, Зв/год	ПДД для категории Б, Зв/год
1	Все тело, гонады (половые органы), красный костный мозг	0,05	0,005
2	Любой отдельный орган, кроме гонад, красного костного мозга, костной ткани, щитовидной железы, кожи, кистей, предплечий, лодыжек и стоп	0,15	0,015
3	Костная ткань, щитовидная железа, кожный покров, кисти, предплечья, лодыжки и стопы	0,30	0,03

Коллективные средства защиты от ионизирующих излучений регламентируются ГОСТом 12.4.120–83 «Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений. Общие требования». В соответствии с этим нормативным документом основными средствами защиты являются стационарные и передвижные защитные экраны, контейнеры для транспортировки и хранения источников ионизирующих излучений, а также для сбора и транспортировки радиоактивных отходов, защитные сейфы и боксы.

Стационарные и передвижные защитные экраны предназначены для снижения уровня излучения на рабочем месте до допустимой величины. Если работу с источниками ионизирующих излучений проводят в специальном помещении – рабочей камере, то экранами служат ее стены, пол и потолок, изготовленные из защитных материалов. Такие экраны носят название стационарных. Для устройства передвижных экранов используют различные щиты, поглощающие или ослабляющие излучение.

Экраны изготавливают из различных материалов. Их толщина зависит от вида ионизирующего излучения, свойств защитного материала и необходимой кратности ослабления излучения k . Величина k показывает, во сколько раз необходимо понизить энергетические показатели излучения (мощность эквивалентной дозы, поглощенную дозу, плотность потока частиц и др.), чтобы получить допустимые значения перечисленных характеристик.

Для сооружения стационарных средств защиты стен, перекрытий, потолков и т.д. используют кирпич, бетон, баритобетон и баритовую штукатурку (в их состав входит сульфат бария – $BaSO_4$). Эти материалы надежно защищают персонал от воздействия гамма- и рентгеновского излучения.

Для создания передвижных экранов используют различные материалы. Защита от альфа-излучения достигается применением экранов из обычного или органического стекла толщиной несколько миллиметров. Достаточной защитой от этого вида излучения является слой воздуха в несколько сантиметров. Для защиты от бета-излучения экраны изготавливают из алюминия или пластмассы (органическое стекло). От гамма- и рентгеновского излучения эффективно защищают свинец, сталь, вольфрамовые сплавы. Смотровые системы изготавливают

из специальных прозрачных материалов, например, свинцового стекла. От нейтронного излучения защищают материалы, содержащие в составе водород (вода, парафин), а также бериллий, графит, соединения бора и т.д. Бетон также можно использовать для защиты от нейтронов.

Защитные сейфы применяются для хранения источников гамма-излучения. Они изготавливаются из свинца и стали.

Приборы дозиметрического контроля делятся на две группы: дозиметры, используемые для количественного измерения мощности дозы, и радиометры, или индикаторы излучения, применяемые для быстрого обнаружения радиоактивных загрязнений. Из отечественных приборов применяются, например, дозиметры марок ДРГЗ-04 и ДКС-04. Первый используется для измерения гамма- и рентгеновского излучения в диапазоне энергий 0,03–3,0 МэВ. Шкала прибора проградуирована в микрорентген/секунду (мкР/с). Второй прибор используется для измерения гамма- и бета-излучения в энергетическом диапазоне 0,5–3,0 МэВ, а также нейтронного излучения (жесткие и тепловые нейтроны). Шкала прибора проградуирована в миллирентгенах в час (мР/ч). Промышленность выпускает также бытовые дозиметры, предназначенные для населения, например, бытовой дозиметр «Мастер-1» (предназначен для измерения дозы гамма-излучения), дозиметр-радиометр бытовой АНРИ-01 («Сосна»). Дозиметр РАДЭКС РД 1008 может измерять мощности доз ИИ различной природы в достаточно широком диапазоне от 0,05 до 9,99 мкЗв/час (от 5 до 999 мкР/час).

Изучение характеристик ИИ в учебных лабораториях

Обучение работе с дозиметрическими приборами и определение характеристик ИИ в учебных заведениях часто сталкивается с дополнительными трудностями, которые связаны с жесткими требованиями по условиям хранения и использованию радиоактивных препаратов.

По этой причине предпочтительным является применение комбинированного процесса обучения – сочетание реального и виртуального экспериментов. На первом этапе обучающиеся знакомятся с дозиметрическим оборудованием (радиометры, дозиметры, пересчетные устройства) и проводят измерение естественного радиоактивного фона. Подобные эксперименты можно разнообразить, создавая для измерительного прибора разные пространственные и временные условия измерения – накрывание каким-то материалом, перемещение в разные точки помещения, изменение времени регистрации и т.п.

Для таких целей лучше всего подходит использование счетчика Гейгера с источником питания ПП-16 и пересчетного устройства типа ПСО2-5. Прибор ПСО2-5 имеет широкий диапазон времени экспозиции (от 0,1 с до 3000 с) и емкость счетчика импульсов 10^6 . После выбора времени экспозиции начало счета импульсов, связанных с приходом на счетчик Гейгера ионизирующих частиц (например, гамма- или рентгеновских квантов), производится нажатием кнопки «ПУСК». После окончания времени экспозиции прибор автоматически отключается, показывая на шкале число зарегистрированных импульсов. После нажатия кнопки «СБРОС» можно проводить следующее измерение.

Если навыки работы с дозиметрическими приборами обучающимися усвоены, то можно переходить к виртуальным экспериментам. В частности, возможно изучить закон изменения интенсивности ИИ при прохождении через слои материалов различной природы и разной толщины, определить активность радиоактивного препарата, рассчитать мощности доз облучения. При этом в качестве виртуального радиоактивного образца выбирается его реальный аналог с реальными характеристиками (например, изотоп кобальта-60 – $^{60}\text{Co}_{27}$ с периодом полураспада $T \approx 5,3$ г.). В процессе радиоактивного распада этот изотоп испускает два

гамма-кванта с известными энергиями (1,17 МэВ и 1,33 МэВ), которые и фиксируются счетчиком Гейгера в случае натурального эксперимента.

Отметим, что по излучению изотопа кобальта-60 рассчитывались зависимости доз облучения от расстояния при ядерных взрывах в г. Хиросиме и г. Нагасаки. Дозы гамма-излучения восстанавливались по термолюминесценции различных кристаллических материалов, входящих в состав строений, размещавшихся на разном расстоянии от эпицентра. Дозы нейтронов оценивались по излучению кобальта-60, который образовывался при активации кобальта-59, содержащегося в стальной арматуре железобетонных сооружений [5]. Потоки медленных нейтронов оценивались по активации вблизи поверхности бетона, а быстрых нейтронов – по активации железа на глубине 8 см в бетоне.

В качестве примера виртуального эксперимента в среде программирования EXCEL приведены таблицы, в которые заносятся результаты измерений. Характеристики изучаемого материала (плотность, линейный коэффициент поглощения) и радиоактивного образца (виртуальная активность) вводятся, исходя из табличных данных и целей эксперимента.

Интенсивность фонового ИИ измеряется, как отмечено ранее, в натурном эксперименте. Интенсивность прошедшего через вещество ИИ определяется на основе известных физико-математических закономерностей ее изменения (при больших значениях интенсивности препарата по отношению к фоновому такую зависимость можно считать экспоненциальной).

Ниже приведена незаполненная табл. 2 для результатов измерений и две таблицы с результатами измерений для свинца и бетона (табл. 3, 4).

Таблица 2.

интенсивность фона $I_{фон}$	№ опыта	материал	толщина слоя $x(m)$	число слоев	время облуч. $t(c)$	интенсивность $I_{средн.}$	интенсивность $I(x)=I_{средн}-I_{фон}$	$\ln I(x)$
—	—		0	0	30	0	0	—
—	—	свинец	—	1	30	0	0	—
—	—	свинец	—	2	30	0	0	—
—	—	свинец	—	3	30	0	0	—
—	—	свинец	—	4	30	0	0	—
—	—	свинец	—	5	30	0	0	—

Таблица 3.

интенсивность фона $I_{фон}$	№ опыта	материал	толщина слоя $x(m)$	число слоев	время облуч. $t(c)$	интенсивность $I_{средн.}$	интенсивность $I(x)=I_{средн}-I_{фон}$	$\ln I(x)$
35	1		0	0	30	1516	1481	7,30
35	2	свинец	0,005	1	30	1016	981	6,89
35	3	свинец	0,01	2	30	681	646	6,47
35	4	свинец	0,015	3	30	457	422	6,04
35	5	свинец	0,02	4	30	306	271	5,60
35	6	свинец	0,025	5	30	205	170	5,14

Таблица 4.

интенсивность фона $I_{\text{фон}}$	№ опыта	материал	толщина слоя x (м)	число слоев	время облуч. t (с)	интенсивность $I_{\text{средн}}$	интенсивность $I(x)=I_{\text{средн}}-I_{\text{фон}}$	$\ln I(x)$
40	1		0	0	30	1512	1472	7,29
40	2	бетон	0,02	1	30	1120	1080	6,98
40	3	бетон	0,04	2	30	830	790	6,67
40	4	бетон	0,06	3	30	615	575	6,35
40	5	бетон	0,08	4	30	455	415	6,03
40	6	бетон	0,1	5	30	337	297	5,69

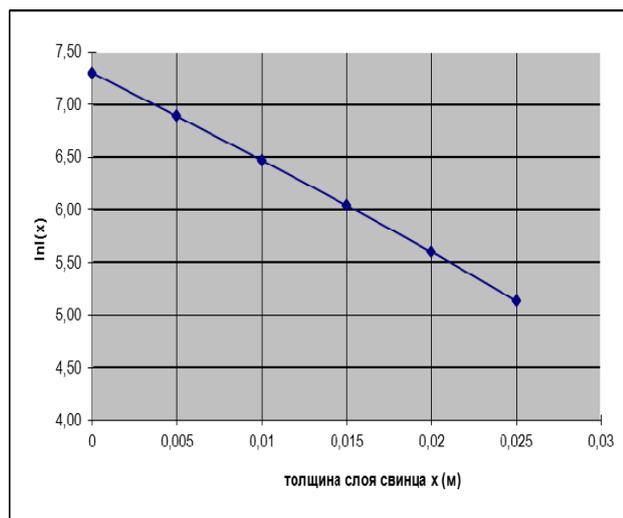
Значения интенсивностей в табл. 3 и 4 занесены в безразмерных величинах – число (N) зарегистрированных счетчиком Гейгера импульсов ИИ. Однако, если средняя энергия гамма-кванта (E) ИИ известна (для кобальта-60 она равна 1,25 МэВ), то интенсивность можно пересчитать в энергетические значения по простой формуле:

$$I = (N \cdot E) / (S \cdot t),$$

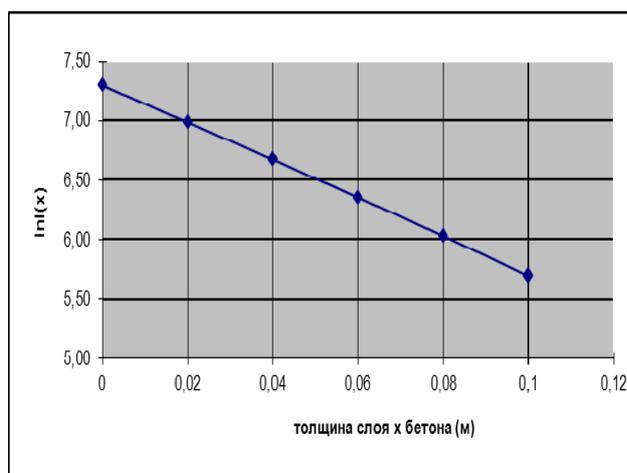
где S – площадь регистрирующей поверхности счетчика Гейгера; t – время регистрации.

В системе СИ единицей измерения интенсивности ИИ является $[I] = 1 \text{ Вт/м}^2$.

Одновременно с заполнением таблиц типа 3 и 4 программой EXCEL строится графическая зависимость изменения интенсивности ИИ при прохождении слоя вещества (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Изменение интенсивности ИИ при прохождении слоя вещества (в полулогарифмическом масштабе): а) – свинец; б) – бетон

По результатам измерений и виду графиков могут быть рассчитаны линейные и массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения веществом, толщина слоев половинного ослабления для разных веществ, проведено наглядное сравнение полученных для разных материалов результатов.

Подобные расчеты обучающиеся проводили для свинца, бетона, алюминия, дерева, стали. Сравнительное обсуждение итогов такого занятия всегда вызывало повышенный интерес и внимание обучающихся.

Еще один виртуальный эксперимент может быть посвящен определению активности радиоактивного препарата и мощности эквивалентной поглощенной дозы, причем интенсивность фонового излучения находится снова в натурном опыте.

На первом этапе эксперимента снимается зависимость интенсивности ИИ от расстояния между источником гамма-квантов и приемником – счетчик Гейгера, соединенный с прибором ПСО2-5. В качестве виртуального радиоактивного препарата снова можно взять кобальт-60.

По результатам измерений заполняется табл. 5 и строится графическая зависимость, приведенная на рис. 2.

Таблица 5

интенсивность фона $N_{\text{фон.}}$	№ опыта	R (м)	R^2 (м ²)	N	$N_{\text{ср.}} = N - N_{\text{фон.}}$	$N_{\text{ср.}} * R^2$ (м ²)
38	1	0,1	0,01	1561	1523	15,2
	2	0,2	0,04	1339	1301	43,9
	3	0,3	0,09	616	578	44,8
	4	0,4	0,16	363	325	44,7
	5	0,5	0,25	246	208	46,5
	6	0,6	0,36	183	145	49,0
	7	0,7	0,49	144	106	51,2
	8	0,8	0,64	119	81	53,0
	9	0,9	0,81	102	64	52,0

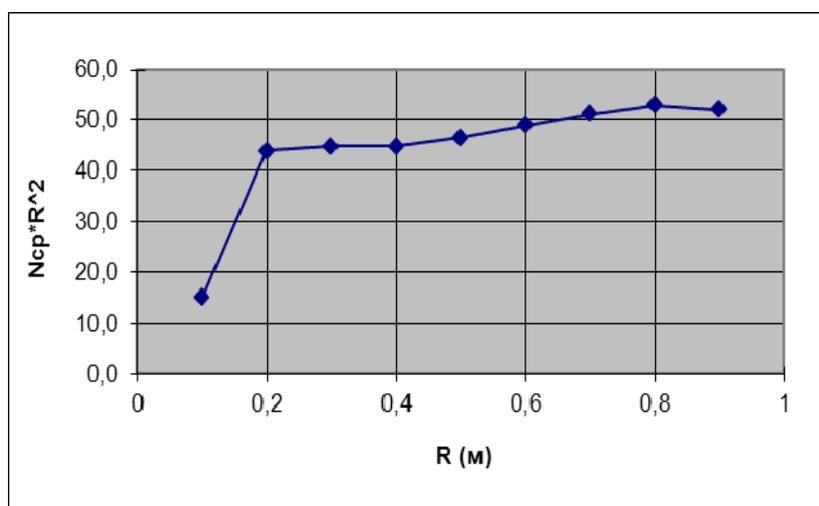


Рис. 2. Определение свойств источника излучения

Характер зависимости на рис. 2 позволяет определить, начиная с какого расстояния от источника излучения его можно принимать как материальную точку. Источник ИИ можно считать точечным, если график на рис. 2 вышел на горизонтальную линию, параллельную оси расстояния (естественно, с учетом погрешностей измерений). В приведенном примере источник ИИ можно считать точечным при расстоянии $R > 0,6$ м.

Источник ИИ должен быть точечным, так как расчетные формулы для активности (A) и мощности экспозиционной, эквивалентной и поглощенной дозы выведены при этом предположении.

Активность радиоактивного препарата определяется по формуле:

$$A = (2 \cdot \pi \cdot (N - N_{\text{фон}}) \cdot R^2) / (m \cdot t \cdot l \cdot d),$$

где R – расстояние от источника ИИ до счетчика Гейгера; m – коэффициент, учитывающий вероятность срабатывания счетчика Гейгера (в условиях опыта с кобальтом-60 полагают, что $m=0,1$ – то есть регистрируется один импульс из десяти пришедших на счетчик); t – время регистрации ИИ; l – длина счетчика Гейгера; d – диаметр счетчика Гейгера.

При условии подстановки всех перечисленных величин в единицах измерения системы СИ, активность получится в Беккерелях.

Мощности доз ИИ для точечного источника можно определить по следующим формулам:

– мощность экспозиционной дозы:

$$X = (K_G \cdot A) / R^2;$$

– мощность поглощенной дозы:

$$P = (K_D \cdot A) / R^2;$$

– мощность эквивалентной дозы:

$$H = (k \cdot K_D \cdot A) / R^2,$$

где K_G – гамма-постоянная для данного радиоактивного препарата; K_D – керма-постоянная, зависящая от вида радиоактивности и свойств поглощающего вещества; k – коэффициент качества излучения.

Значения постоянных для кобальта-60 равны:

$$K_G = 2,56 \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \cdot \text{м}^2 / \text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{Бк}; K_D = 1,0 \cdot 10^{-16} \text{ Гр} \cdot \text{м}^2 / \text{с} \cdot \text{Бк}.$$

Полученное значение мощности эквивалентной дозы обучающиеся должны сравнить с ПДД ИИ, которые приведены в табл. 1 и сделать вывод о степени опасности изучаемого вида ИИ.

Таким образом, приведенная методика изучения характеристик ИИ позволяет без дополнительных сложностей, связанных с эксплуатацией реальных источников ИИ, провести обучение работе с дозиметрическими приборами и подробно – в режиме сравнительного эксперимента – обсудить все практически важные характеристики радиоактивных препаратов.

Литература

1. О долгосрочных перспективах развития системы МЧС России (МЧС России–2030): Доклад Министра Рос. Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. М.: МЧС России, 2012.
2. Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020 года: Распоряжение Правительства Рос. Федерации от 8 дек. 2011 г. № 2227-р. URL: <http://www.rg.ru> (дата обращения: 18.07.2014).
3. Об образовании в Российской Федерации (с изменениями и дополнениями на 2013 г.): Закон Рос. Федерации от 29 дек. 2012 г. № 273-ФЗ. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
4. Ильин Л.А. Основы защиты организма от воздействия радиоактивных веществ. М: Атомиздат, 1977. 256 с.
5. Гуськов А.К., Харитонов В.В., Барабанов А.В. Массовые радиационные поражения и вопросы организации медицинской помощи. М.: Медицина, 1987. 80 с.

6. Михайлов Л.А. Чрезвычайные ситуации природного, техногенного и социального характера и защита от них / Л.А. Михайлов, В.П. Соломин. СПб.: Питер, 2008. 234 с.
7. Цибулько А.В. Защита населения и объектов от чрезвычайных ситуаций. Радиационная безопасность. Минск: Минск. ин-т управл., 2008. 228 с.