

А.К. Сухоручкин

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ МКРЗ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОЗОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОЗОЛЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
 Контактное лицо: Сухоручкин Андрей Константинович Sukhoruchkin_AK@nrcki.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Разработать метод расчета дозового коэффициента радиоактивного аэрозоля для мультимодального распределения активности радионуклида по размерам частиц.

Материал и методы: Физическая предпосылка предлагаемого метода состоит в том, что мультимодальное распределение может быть результатом существования нескольких источников аэрозолей различной дисперсности. В базе данных МКРЗ каждому значению дозового коэффициента аэрозоля соответствует одна из десяти функций логарифмически нормального (одномодального) распределения с заданными параметрами. В разработанном методе сумма этих стандартных функций (каждая со своим весом) используется для аппроксимации результата измерения дисперсного состава аэрозоля. Веса функций определяются из условия наилучшей аппроксимации по методу наименьших квадратов. После этого дозовый коэффициент исследуемого аэрозоля рассчитывается по свойству аддитивности дозовых величин: каждый вес умножается на соответствующее известное из базы данных МКРЗ значение дозового коэффициента, и полученные произведения складываются.

Результаты: Выполнена серия численных экспериментов, в каждом из которых «экспериментальные» точки просто нанесены на график функции некоторого кумулятивного распределения. Координаты точек как исходные данные вводятся в программу, которая действует по разработанному алгоритму. Вычисленное значение дозового коэффициента сравнивается с истинным значением и/или со значением, полученным методом линейной интерполяции по АМАД.

Заключение: Физические предпосылки и результаты численных экспериментов подтверждают правомерность применения разработанного метода.

Ключевые слова: радиоактивный аэрозоль, аэродинамический диаметр частиц, распределение активности, аппроксимация, дозовый коэффициент, база данных МКРЗ

Для цитирования: Сухоручкин А.К. Применение базы данных МКРЗ для расчета дозового коэффициента аэрозоля мультимодальной дисперсности. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(1):59-64.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-59-64

Известно, что доза внутреннего облучения, обусловленная ингаляционным поступлением радионуклида, определяется по соотношению вида [1]:

$$E = e(50)I, \quad (1)$$

где E – ожидаемая (полувековая) эффективная доза, Зв; $e(50)$ дозовый коэффициент (эффективная доза на единицу поступления), Зв/Бк; I – поступление радионуклида через органы дыхания, Бк.

Поступление I устанавливается по результатам радиационного мониторинга (индивидуального или рабочих мест), дозовый коэффициент $e(50)$ – известная (табулированная) величина, представленная в Нормах безопасности [1, 2] и, наиболее полно, в базе данных МКРЗ [3]. Дозовый коэффициент зависит от физико-химических свойств радионуклида и, в частности, от дисперсности аэрозоля.

База данных МКРЗ

В [3] представлены дозовые коэффициенты, рассчитанные в предположении, что имеет место логарифмически нормальное распределение (ЛНР) активности аэрозоля по его частицам:

$$\varphi(d_a) = \frac{A}{d_a \ln s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d_a - \ln d_{a0})^2}{2 \ln^2 s}\right) \quad (2)$$

где $\varphi(d_a)$ – плотность распределения активности аэрозоля по частицам диаметра d_a (по диаметрам частиц), Бк×мкм⁻¹; d_a – аэродинамический диаметр (АД) частицы, мкм; A – активность аэрозоля, Бк; параметры распределения: d_{a0} – аэродинамический медианный по активности диаметр (АМАД) аэрозоля, мкм; s – стандартное геометрическое отклонение (СГО).

База данных МКРЗ содержит дозовые коэффициенты, соответствующие набору из десяти значений этих параметров при определенном их сочетании (табл. 1).

Таблица 1

Параметры логарифмически нормальных распределений активности аэрозоля, принятые в базе данных МКРЗ [3], и соответствующие дозовые коэффициенты $e(50)$ для ^{239}Pu типа S поглощения из легких
The parameters of the logarithmically normal distribution of aerosol activity, adopted in the ICRP database [3], and the corresponding dose coefficients $e(50)$ for ^{239}Pu type S absorption from the lungs

Обозначение функции распределения	Плотность распределения (2)		Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7	Φ_8	Φ_9	Φ_{10}
	Кумулятивное распределение (4)		Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7	Φ_8	Φ_9	Φ_{10}
Параметры распределения	АМАД	d_{a0} , мкм	0,001	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	5,0	10
	СГО	s	1,002	1,009	1,053	1,25	1,85	2,34	2,47	2,50	2,50	2,50
$e(50)$, мкЗв/Бк			13	35	66	72	39	20	14	11	8,0	5,8

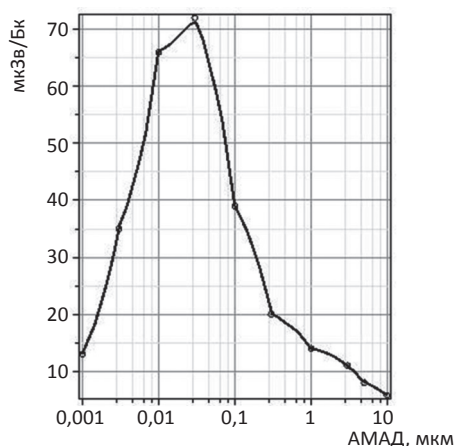


Рис. 1. Зависимость дозового коэффициента ^{239}Pu (тип S) от АМАД: точки – данные МКРЗ [3], ломанная кривая – линейная интерполяция по соседним точкам
Fig. 1. The dependence of the dose coefficient ^{239}Pu (type S) on AMAD: points – ICRP data [3], a broken curve – linear interpolation by neighboring points

Коэффициенты $e(50)$ для ^{239}Pu типа S помещены в таблицу как пример, и будут использоваться в дальнейшем. Значения СГО вычислены по алгоритму, представленному в Публикации 66 ([4], разделы D.4, D.13), при референсных значениях индивидуальных параметров аэрозольных частиц: плотность материала $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, динамический коэффициент формы $\chi = 1,5$ [4].

Параметры реально измеренного распределения активности аэрозоля могут в той или иной степени отличаться от табличных значений. В большинстве случаев возможна интерполяция дозовых коэффициентов по АМАД (рис. 1), однако если значения СГО существенно отличаются от табличных значений или форма распределения отличается от ЛНР, то такая интерполяция сопряжена с погрешностью, значение которой не установлено.

Значение дозового коэффициента можно получить, используя экспериментальные данные по дисперсному составу аэрозолей в качестве входных параметров в дозиметрической модели дыхательного тракта человека [4], но это корректно только в случае распределения вида (2), кроме того, компьютерный код не всегда доступен.

Поэтому целесообразно разработать альтернативный метод расчета дозового коэффициента аэрозоля, распределение активности в котором отличается от ЛНР и/или значения АМАД и СГО не соответствуют набору функций, представленному в табл. 1.

Сущность предлагаемого метода

Физическая предпосылка предлагаемого метода состоит в том, что отклонение от логнормального распределения активности может быть результатом существования двух или нескольких источников аэрозолей различной дисперсности, например, представляющих механические, термические, гидравли-

ческие воздействия на радиоактивно загрязненные поверхности.

Предлагаемый метод расчета основан на использовании уже известных из базы данных [3] дозовых коэффициентов для стандартных распределений. При этом произвольное экспериментально измеренное распределение аппроксимируем арифметической суммой F нескольких функций логнормальных распределений Φ_i :

$$F = \sum_{i=k}^n q_i \Phi_i, \quad (3)$$

где q_i – вес функции Φ_i (функции МКРЗ) с табличными значениями АМАД и СГО (табл. 1), при этом $0 \leq q_i \leq 1$ и $\sum_{i=k}^n q_i = 1$; $k, \dots, n$ – номера функций Φ_i , участвующих в аппроксимации ($k, n \leq 10$); Φ_i – кумулятивная функция распределения, определяемая как интеграл с переменным верхним пределом:

$$\Phi_i(d_a) = \frac{1}{A} \int_0^{d_a} \varphi_i(d'_a) dd'_a. \quad (4)$$

Значение Φ_i равно доле δ активности аэрозоля, ассоциированной с частицами, имеющими АМАД в диапазоне от 0 до d_a . По определению $\Phi_i(0) = 0$, $\Phi_i(\infty) = 1$. Этими же свойствами обладает и сумма (3) этих функций.

Следует сказать, что ранее в работе [6] была применена алгебраическая сумма вида (3), т.е. веса q_i могли принимать отрицательные значения. При этом в отдельных случаях удавалось получить более точную аппроксимацию, но в некоторых других случаях аппроксимирующая функция F теряла свойство монотонного возрастания, присущее кумулятивным функциям распределения, и аппроксимация выглядела явно неудачной.

Известно, что на использовании функции (4) основан наиболее простой и эффективный способ представления экспериментальных данных [4]. В логарифмически-вероятностном масштабе эта функция ЛНР отображается прямой линией, по ее расположению определяют параметры АМАД и СГО (рис. 2).

Если аппроксимация (3) какого-либо экспериментального распределения получена, т.е. выбран набор функций Φ_i и определены их веса q_i , то соответствующий аппроксимирующему распределению (3) дозовый коэффициент $e(50)_{\text{анпр}}$ определяется из свойства аддитивности дозовых величин суммой:

$$e(50)_{\text{анпр}} = \sum_{i=k}^n q_i e(50)_i, \quad (5)$$

где $e(50)_i$ – табличное значение дозового коэффициента, соответствующее функции Φ_i .

Процедура аппроксимации

В нашем распоряжении имеется десять функций Φ_i ($i = 1, \dots, 10$), представленных в табл. 1 и на рис. 2, которые, вообще говоря, можно использовать в процедуре аппроксимации, но не все из них целесообразно применять одновременно. В зависимости от вида конкретного экспериментального распределения, к его аппроксимации достаточно привлечь несколько

Таблица 2

Численные эксперименты по аппроксимации результатов измерений дисперсного состава аэрозоля функциями МКРЗ по алгоритму (3, 6, 7)

Numerical experiments to approximate the results of measurements of the aerosol dispersed composition by the ICRP functions according to the algorithm (3, 6, 7)

Эксперимент N°	рис. N°	Линия расположения точек – результатов измерения	Аппроксимирующая кривая	АМАД, мкм	Дозовый коэффициент, мкЗв/Бк		
					$e(50)_{sic}$	$e(50)_{аннр}$	$e(50)_{АМАД}$
1	2	$\Phi = 1/2 \cdot (\Phi_4 + \Phi_9)$	$F = 0,5(\Phi_4 + \Phi_9)$	0,3	40	40	20
2	3	$\Phi = 1/4 (\Phi_4 + \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8)$	$F = 0,25(\Phi_4 + \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8)$	0,5	28,5	28,5	18,3
3	4	Φ_9	$F = 0,574\Phi_8 + 0,426\Phi_{10}$	5,0	8,0	8,8	9,5
4	5	$\Phi = 1 - \exp(-0,1d_n)$	$F = 0,072\Phi_6 + 0,025\Phi_7 + 0,247\Phi_8 + 0,656\Phi_{10}$	6,0	–	8,3	8,4
5	6	$\Phi = 1 - 1/(1 + d_n)$	$F = 0,013\Phi_4 + 0,178\Phi_5 + 0,546\Phi_7 + 0,263\Phi_9$	1,0	–	16,7	14
6	7	$\Phi = 0,3\Phi(0,2;1,15) + 0,4\Phi(0,7;1,5) + 0,2\Phi(2,0;2,5) + 0,1\Phi(7,0;2,5)$	$F = 0,452\Phi_6 + 0,424\Phi_7 + 0,0\Phi_8 + 0,124\Phi_9$	0,7	–	16,0	16,6

функций Φ_i , проходящих наиболее близко к экспериментально измеренным точкам.

В некоторых случаях, если, например, известны параметры отдельных источников, формирующих исследуемую аэрозольную систему, функции Φ_i и веса q_i могут быть подобраны из физических предпосылок.

В общем случае значения весов q_i можно определить по методу наименьших квадратов, т.е. путем минимизации значения следующей функции Y от переменных q_i :

$$Y(q_k, \dots, q_n) = \sum_{j=1}^m \left(p(d_{aj}) - \sum_{i=k}^n q_i \Phi_i(d_{aj}) \right)^2, \quad (6)$$

где p – экспериментально измеренное значение кумулятивной функции распределения в точке d_{aj} ; m – чис-

ло точек (число каскадов импактора), в которых выполнено измерение.

Тогда искомые веса, при которых функция Y принимает минимальное значение, определяются из решения системы уравнений вида:

$$\frac{\partial Y}{\partial q_i} = 0, \quad i = k, \dots, n. \quad (7)$$

Число уравнений в системе (7) равно числу привлекаемых к аппроксимации функций.

Для решения задачи по алгоритму (3, 6, 7) разработана программа в среде математического пакета Maple [7], которая вычисляет значения q_i , осуществляет графическое представление аппроксимирующей функции (3) в логарифмически-вероятностном или в полулогарифмическом масштабе и вычисляет значение дозового коэффициента (5).

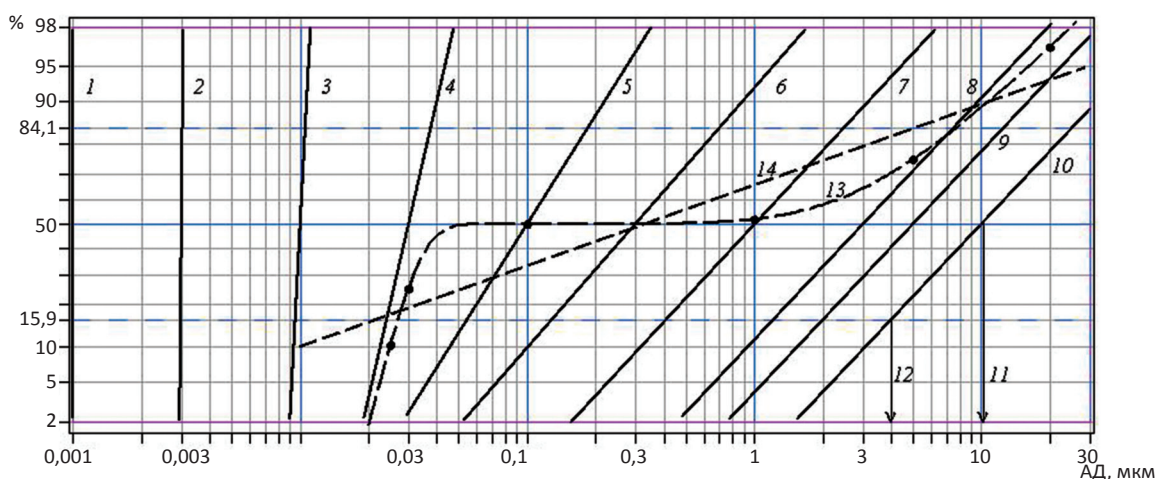


Рис. 2. Точки – результаты условного измерения (численный эксперимент № 1). Кумулятивные функции распределения активности аэрозоля по диаметрам частиц. Прямые линии 1...10 – Φ_i , т.е. функции ЛНР с АМАД и СГО по табл. 1 (функции МКРЗ). Стрелки 11, 12 – алгоритм определения параметров ЛНР на примере функции Φ_{10} : $d_{a0} = 10$ мкм, $d_{a0}/s = 4$ мкм, следовательно, $s = 2,5$. Кривая 13 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом.

14 – аппроксимация результатов измерения прямой линией

Fig. 2. Points – results of conditional measurement (numerical experiment No. 1). Cumulative distribution functions of aerosol activity over particle diameters. Straight lines 1–10 – Φ_i , i.e. functions of LPR with AMAD and SGO according to the table. 1 (ICRP functions).

Arrows 11, 12 – an algorithm for determining the LPR parameters using the function Φ_{10} as an example: $d_{a0} = 10 \mu\text{m}$, $d_{a0}/s = 4 \mu\text{m}$, therefore, $s = 2.5$. Curve 13 – approximation of the measurement results by the proposed method. 14 – approximation of the measurement results by a straight line

Результаты и обсуждение

На рис. 2–7 и в табл. 2 представлены результаты численных экспериментов, в каждом из которых «экспериментальные» точки просто нанесены на график функции некоторого кумулятивного распределения. Координаты точек, как исходные данные, вводятся в программу, которая действует по указанному алгоритму (3,6,7). Вычисленное таким способом значение коэффициента $e(50)_{\text{анпр}}$ сравнивается в табл. 2 с истинным значением $e(50)_{\text{sic}}$ и/или значением $e(50)_{\text{АМАД}}$,

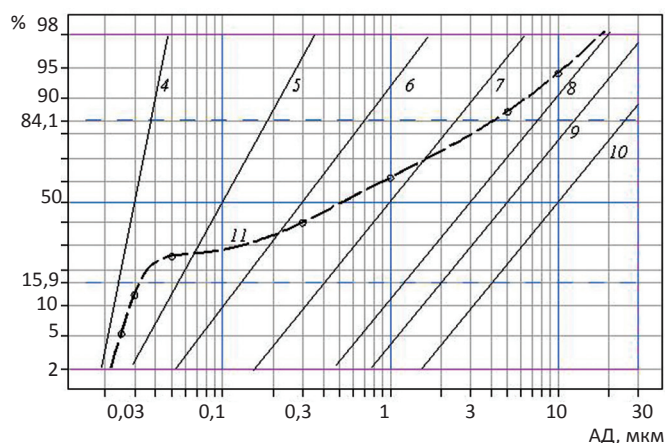


Рис. 3. Точки – результаты условного измерения (эксперимент № 2). Прямые линии 4–10 – Φ_i , т.е. функции ЛНР с АМАД и СГО по табл. 1 (функции МКРЗ). Кривая 11 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом

Fig. 3. Points – results of conditional measurement (experiment No. 2). Straight lines 4–10 – Φ_i , i.e. functions of LPR with AMAD and SGO according to the table. 1 (ICRP functions). Curve 11 – approximation of the measurement results by the proposed method

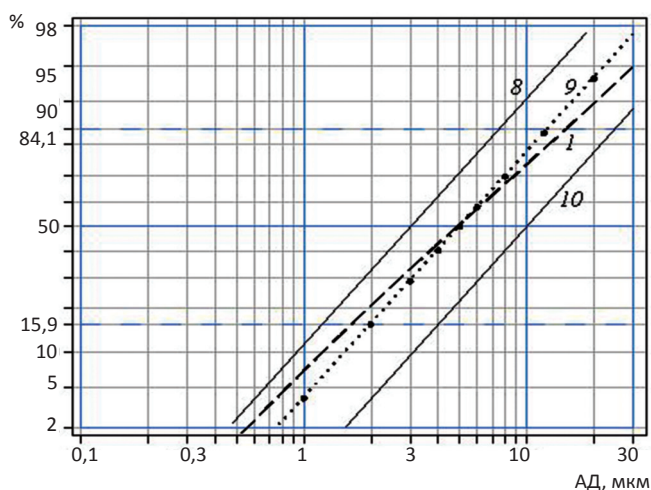


Рис. 4. Точки – результаты условного измерения (эксперимент № 3). Прямые линии 8–10 – Φ_i , т.е. функции ЛНР с АМАД и СГО по табл. 1 (функции МКРЗ). Кривая 1 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом

Fig. 4. Points – results of conditional measurement (experiment No. 3). Straight lines 8–10 – Φ_i , i.e. functions of LPR with AMAD and SGO according to the table. 1 (ICRP functions). Curve 1 – approximation of the measurement results by the proposed method

полученным через значение АМАД линейной интерполяцией значений $e(50)$ из табл. 1.

На рис. 2 показан набор из десяти функций лог-нормального распределения (функции МКРЗ), который можно использовать в процедуре аппроксимации, а также результаты условного импакторного измерения. Точки (результаты измерения) подобраны таким образом, что моделируют выраженное бимодальное распределение вида:

$$\Phi = 1/2 \cdot \Phi_4 + 1/2 \cdot \Phi_9, \quad (8)$$

в котором почти отсутствуют частицы в диапазоне $d_a = 0,1 \dots 1,0$ мкм – об этом свидетельствует горизонтальная часть графика. Истинное значение $e(50)_{\text{sic}}$ дозового коэффициента такого аэрозоля составляет $(e(50)_4 + e(50)_9)/2 = 40$ мкЗв/Бк (табл. 1).

В соответствии с расположением на графике экспериментальных точек для целей аппроксимации выбраны шесть функций с номерами $i = 4, \dots, 9$. Расчет по алгоритму (3, 6, 7) определил следующие значения весов: $q_4 = 0,5$; $q_5 = q_6 = q_7 = q_8 = 0,0$; $q_9 = 0,5$, т.е. в этом случае программа точно распознала составляющие исходного распределения (8), и аппроксимирующая кривая прошла через все экспериментальные точки. В соответствии с (5) и значениями $e(50)$ в табл. 1 вычисленное значение $e(50)_{\text{анпр}}$ составляет 40 мкЗв/Бк, т.е. совпадает с $e(50)_{\text{sic}}$.

Для сравнения на рис. 2 показан также обычный способ обработки экспериментальных данных: по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов проведена аппроксимирующая прямая, по расположению которой определяется $d_{a0} = 0,3$ мкм, и, соответственно, по табл. 1 определяется значение $e(50) = 20$ мкЗв/Бк.

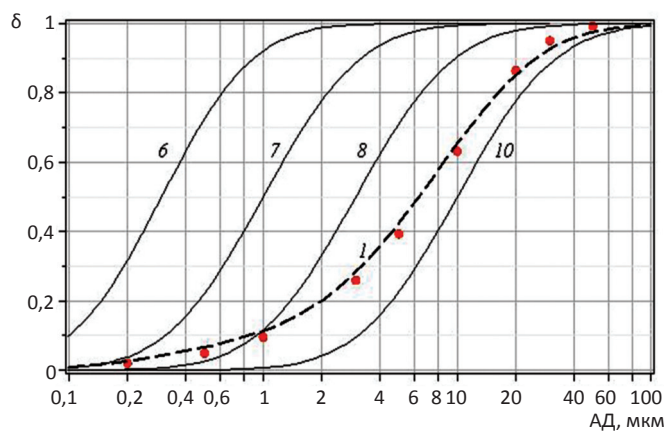


Рис. 5. Точки – результаты условного измерения (эксперимент № 4) расположены по кривой распределения Разина – Раммплера [8]. 6, 7, 8, 10 – Φ_i , т.е. функции ЛНР с АМАД и СГО по табл. 1 (функции МКРЗ).

Кривая 1 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом

Fig. 5. Points – results of conditional measurement (experiment No. 4) are located along the Razin – Rammler distribution curve [8]. 6, 7, 8, 10 – Φ_i , i.e. functions of LPR with AMAD and SGO according to the table. 1 (ICRP functions). Curve 1 – approximation of the measurement results by the proposed method

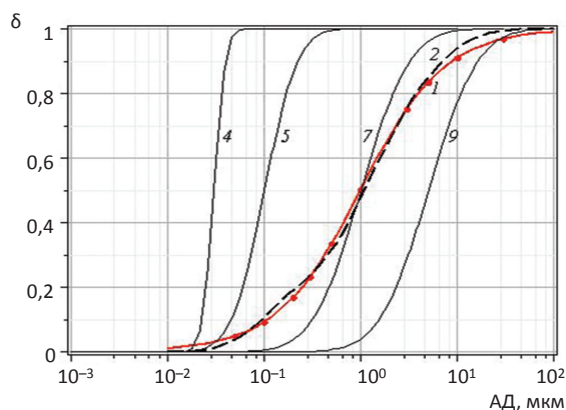


Рис. 6. Точки – результаты условного измерения (эксперимент № 5) расположены по гиперболической кривой 1. 4, 5, 7, 9 – Φ_p , т.е. функции ЛНР с АМАД и СГО по табл. 1 (функции МКРЗ). Кривая 2 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом

Fig. 6. Points – the results of a conditional measurement (experiment No. 5) are located along the hyperbolic curve 1. 4, 5, 7, 9 – Φ_p , i.e. functions of LPR with AMAD and SGO according to the table 1 (ICRP functions). Curve 2 – approximation of the measurement results by the proposed method

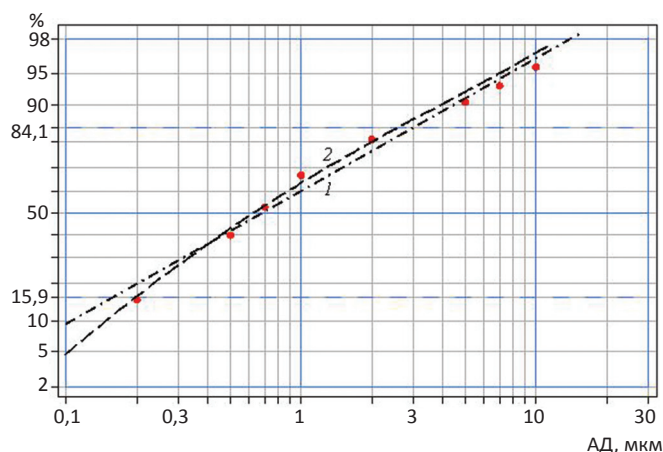


Рис. 7. Точки – результаты условного измерения (эксперимент № 6) расположены по линии мультимодального распределения, указанного в табл. 2. 1 – аппроксимация результатов измерения прямой линией по методу наименьших квадратов; кривая 2 – аппроксимация результатов измерения предлагаемым методом

Fig. 7. Points – the results of the conditional measurement (experiment No. 6) are located along the line of the multimodal distribution indicated in the table 2. 1 – approximation of the measurement results by a straight line according to the least squares method; curve 2 – approximation of the measurement results by the proposed method

Аналогичные действия выполнены и в экспериментах по аппроксимации других распределений. В экспериментах № 1, 2, 3 точки результатов измерений размещены так, чтобы было известно истинное

значение коэффициента $e(50)$. Эти эксперименты проведены с целью верификации программы вычислений по алгоритму (3, 6, 7), при этом получены вполне предсказуемые правильные результаты.

В эксперименте № 2, в отличие от № 1, на кривой распределения отсутствует горизонтальный участок, поэтому затруднительно визуально разделить это мультимодальное распределение на отдельные составляющие, но предлагаемый метод такое разделение позволяет выполнить. Возможно, в каких-то случаях подобные разложения могут быть полезны при решении задач организации и оптимизации радиационной защиты по фактору внутреннего облучения персонала.

В эксперименте № 3 точки лежат на графике функции Φ_9 . С целью избежать тривиального (точного) решения, на этапе аппроксимации и при вычислении $e(50)_{\text{АМАД}}$ сделано предположение, что в наборе функций МКРЗ распределение Φ_9 отсутствует. При этом отклонение от истинного значения $e(50)_{\text{sic}}$ составило 10 %, но это все же меньше, чем в случае применения линейной интерполяции (~19 %, табл. 2).

Эксперименты № 4–6 выполнены с целью демонстрации возможностей рассматриваемого здесь метода аппроксимации различных кумулятивных распределений.

В эксперименте № 4 точки расположены в соответствии с эмпирическим распределением Разина – Рамллера $\Phi = 1 - \exp(-a(d_a/2)^S)$, представленным, например, в монографии [8]. Точки на рис. 5 соответствуют значениям $a = 0,2$; $S = 1,0$.

В эксперименте № 5 точки расположены в соответствии с обычной гиперболической зависимостью.

В эксперименте № 6 точки расположены в соответствии с мультимодальным распределением $\Phi = 0,3\Phi(0,2;1,15) + 0,4\Phi(0,7;1,5) + 0,2\Phi(2,0;2,5) + 0,1\Phi(7,0;2,5)$, где запись вида $0,3\Phi(0,2;1,15)$ означает кумулятивную функцию ЛНР с весом $q = 0,3$, АМАД $d_{a0} = 0,2$ мкм и СГО $s = 1,15$. Точное значение $e(50)_{\text{sic}}$ в этом случае неизвестно, но приближенные значения $e(50)_{\text{appr}}$ и $e(50)_{\text{АМАД}}$, полученные разными методами, практически совпадают.

Заключение

Из рис. 2–7 и табл. 2 следует, что предложенный метод аппроксимации (3) и расчета (5) дает удовлетворительные результаты. Таким образом, база данных МКРЗ содержит функции, позволяющие выполнить аппроксимацию, вероятно, любого мультимодального распределения и рассчитать дозовый коэффициент аэрозоля сложного дисперсного состава, отличающегося от простого ЛНР.

Application of the ICRP Database for Calculation of the Dose Coefficient for Aerosol Having Multimodal Particle Size Distribution

A.K. Sukhoruchkin

National Research Centre “Kurchatov Institute”.
E-mail: Sukhoruchkin_AK@nrcki.ru

ABSTRACT

Purpose: Development of a method for calculating radioactive aerosol dose coefficient when the aerosol particle size measurements resulted in a multimodal radionuclide activity distribution by particle diameters.

Material and methods: The physical prerequisite for the proposed method is that the multimodal distribution may be caused by the presence of several sources of aerosols with different particle sizes. In the ICRP database to each value of the aerosol dose coefficient there corresponds one of ten functions of log-normal (unimodal) distribution with specified parameters. In the developed method the result of the aerosol particle size measurement is approximated by the sum of said standard functions with weight factors of each of the functions defined such that the best least squares approximation is obtained. Then the dose coefficient of the aerosol under study is calculated based on the dose value additivity property, i.e. each weight factor is multiplied by a respective value of the dose coefficient from the ICRP database, and the obtained products are added up.

Results: There was carried out a series of numerical experiments, in each of which “experimental” points were simply plotted on a graph of a certain cumulative distribution function. Coordinates of the points are used as input for the programme implementing the developed algorithm. The calculated dose coefficient value is compared with the true value and/or the value obtained with the linear interpolation method using the AMAD.

Conclusion: Physical prerequisites and results of numerical experiments confirm the validity of the developed method.

Key words: radioactive aerosol, aerodynamic diameter of a particle, activity distribution, approximation, dose coefficient, ICRP database

For citation: Sukhoruchkin AK. Application of the ICRP Database for Calculation of the Dose Coefficient for Aerosol Having Multimodal Particle Size Distribution. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(1):59-64. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-59-64

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности № 115. – Вена: МАГАТЭ. 1997. 382 с. [IAEA. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115, 1996. (In Russ.).]
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09. М. 2009. 100 с. [Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). SP 2.6.1.2523-09. Moscow. 2009, 100 p. (In Russ.).]
3. The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. ICRP CD-ROMS (Version 3.0, 1998–2011).
4. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Annals of ICRP, 1994.
5. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: «МИР». 1987. 287 с. [Reist PC. Introduction to Aerosol Science. New York: Macmillan, 1984, 299 p. (In Russ.).]
6. Сухоручкин АК. Расчет дозового коэффициента аэрозоля произвольной дисперсности. В сб.: «Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля». 2005. Вып. 3, ч. 1. С. 98–101. [Sukhoruchkin AK. Calculation of the dose factor for aerosol having arbitrary particle size distribution. In: Safety issues related to nuclear power plants and Chernobyl. 2005. Issue 3, Part 1, P. 98–101. (In Russ.).]
7. Maple 2018.2. Licensed to: NRC Kurchatov Institute. www.maplesoft.com.
8. Фукс НА. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 352 с. [Fuks NA. The Mechanics of Aerosols. Moscow, USSR Academy of Sciences Publishing House. 1955. 352 p. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность д.т.н. С.М. Шинкареву за замечания и обсуждение данной статьи.

Acknowledgments. The author expresses sincere gratitude to Shinkarev SM, Dr Sci Tech, for comments and discussion of this article.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 14.08.2019 № 1808).

Financing. This work was supported by the Research Center “Kurchatov Institute” (order of August 14, 2019, No. 1808).

Поступила: 23.01.2020. **Принята к публикации:** 27.01.2020.

Article received: 23.01.2020. **Accepted for publication:** 27.01.2020.