

## РАСЧЕТ ДОЗОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОЗОЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ

А. К. Сухоручкин

*РНИЦ «Курчатовский институт», Москва*

Разработан метод расчета дозового коэффициента аэрозоля произвольной дисперсности с помощью базы данных МКРЗ. Метод основан на аппроксимации произвольного распределения суммой функций логнормального распределения с заданными параметрами. Вычислительная процедура реализована с помощью математического пакета Maple.

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 (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 международных нормах безопасности [1] и, более полно, в базе данных МКРЗ [2]. Дозовый коэффициент зависит от физико-химических свойств радионуклида и, в частности, от дисперсности аэрозоля.

### База данных МКРЗ

В [1, 2] представлены дозовые коэффициенты, рассчитанные в предположении, что активность аэрозоля распределена по его частицам в соответствии с логарифмически нормальным законом:

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

где  $\varphi(d_a)$  - плотность распределения активности аэрозоля по частицам диаметра  $d_a$  (по диаметрам частиц), Бк·мкм<sup>-1</sup>;  $d_a$  - 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 (таблица).

**Параметры логарифмически нормальных распределений активности аэрозоля, принятые в базе данных МКРЗ [2], и соответствующие дозовые коэффициенты  $e(50)$  для <sup>239</sup>Pu типа S поглощения из легких**

Обозначение функции распределения	Плотность распределения (2)	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_7$	$\varphi_8$	$\varphi_9$	$\varphi_{10}$
	Кумулятивное распределение (4)	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$	$\Phi_7$	$\Phi_8$	$\Phi_9$	$\Phi_{10}$
Параметры распределения	АМАД, мкм	0,001	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	5,0	10
	СГО	1,002	1,009	1,053	1,25	1,85	2,34	2,47	2,50	2,50	2,50
$e(50) \cdot 10^5$ , Зв/Бк		1,3	3,5	6,8	7,4	4,0	2,0	1,5	1,1	0,83	0,59

В таблице в качестве примера представлены также дозовые коэффициенты  $e(50)$  для  $^{239}\text{Pu}$ ; тип поглощения из легких обусловлен химическим соединением радионуклида [1].

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, однако если значения СГО существенно отличаются от табличных значений или форма распределения отличается от логнормального распределения, то такая интерполяция сопряжена с погрешностью, значение которой не установлено.

Точное значение дозового коэффициента можно получить, используя экспериментальные данные по дисперсному составу аэрозолей в качестве входных параметров в дозиметрической модели дыхательного тракта человека [3]. Эти расчеты весьма трудоемки, а компьютерный код не всегда доступен.

### Сущность метода

Здесь предлагается более простой метод расчета дозового коэффициента аэрозоля произвольной дисперсности, основанный на использовании уже известных дозовых коэффициентов для стандартных распределений.

С этой целью произвольное экспериментально измеренное распределение следует аппроксимировать алгебраической суммой  $\Phi$  нескольких функций логнормальных распределений  $\Phi_i$ :

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

где  $q_i$  - вес функции  $\Phi_i$  (функции МКРЗ) с табличными значениями АМАД и СГО (см. таблицу),  $k, \dots, n$  - номера функций  $\Phi_i$ , участвующих в аппроксимации ( $k, n \leq 10$ ), при этом  $\sum_{i=k}^n q_i = 1$ ;  $\Phi_i$  - 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  $\Phi_i$  равно доле активности аэрозоля, ассоциированной с частицами, имеющими АД в диапазоне от 0 до  $d_a$ . По определению  $\Phi_i(0) = 0$ ,  $\Phi_i(\infty) = 1$ . Этими же свойствами обладает и алгебраическая сумма (3) этих функций.

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

Если аппроксимация (3) какого-либо экспериментального распределения получена, т.е. выбран набор функций  $\Phi_i$  и определены их веса  $q_i$ , то дозовый коэффициент, соответствующий распределению  $\Phi$ , определяется из свойства аддитивности дозовых величин суммой коэффициентов

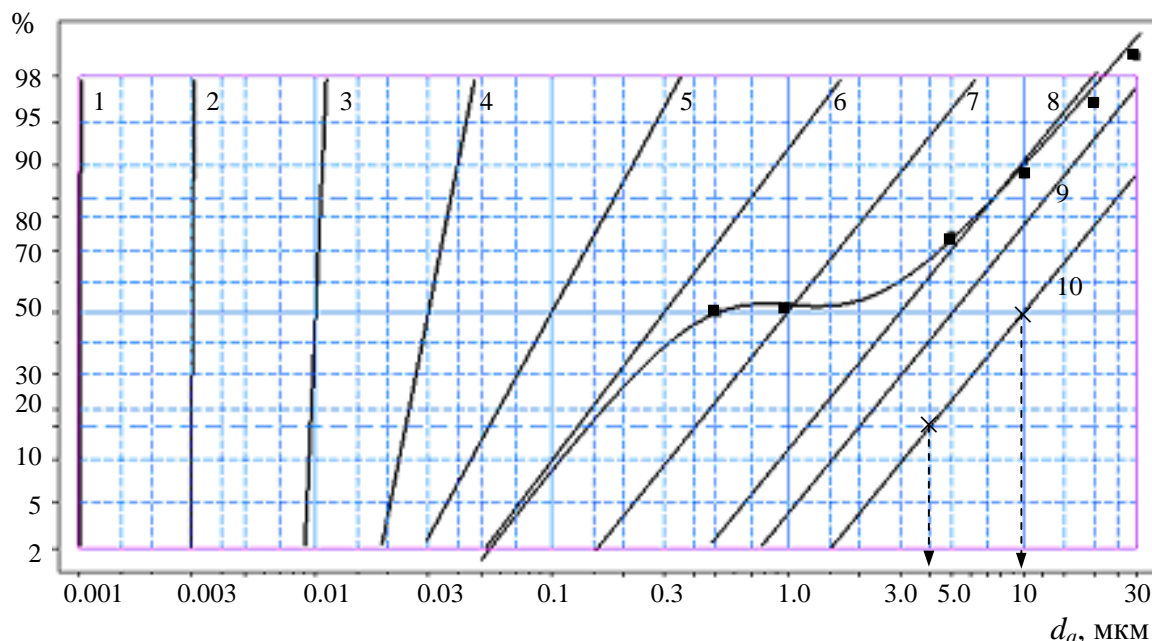
$$e(50) = \sum_{i=k}^n q_i e(50)_i, \quad (5)$$

где  $e(50)_i$  - табличное значение дозового коэффициента, соответствующее функции  $\Phi_i$ .

### Процедура аппроксимации

В нашем распоряжении имеется десять функций  $\Phi_i$  ( $i = 1, \dots, 10$ ), представленных в таблице и на рисунке, которые, вообще говоря, можно использовать в процедуре аппрокси-

мации, но не все из них целесообразно применять одновременно. В зависимости от вида конкретного экспериментального распределения, к его аппроксимации достаточно привлечь несколько функций  $\Phi_i$ , проходящих наиболее близко к экспериментально измеренным точкам.



Кумулятивные функции распределения активности аэрозоля по диаметрам частиц. Прямые линии – функции  $\Phi_i$  логнормальных распределений с различными значениями АМАД и СГО (функции МКРЗ):

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_{a0}$ , мкм	0,001	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	5,0	10
$s$	1,002	1,009	1,053	1,25	1,85	2,34	2,47	2,50	2,50	2,50

Точки – результаты некоторого условного измерения.

Кривая – аппроксимация результатов измерения суммой четырех функций МКРЗ:

$$\Phi = 0,898\Phi_6 - 0,779\Phi_7 + 0,713\Phi_8 + 0,168\Phi_9.$$

Стрелки - алгоритм определения значений параметров логнормального распределения на примере функции  $\Phi_{10}$ :  $d_{a0} = 10$  мкм,  $d_{a0}/s = 4$  мкм, следовательно,  $s = 2,5$ .

В некоторых случаях, если, например, известны параметры отдельных источников, формирующих исследуемую аэрозольную систему, функции  $\Phi_i$  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  $d_{aj}$ ;  $m$  – число точек (число каскадов импактора), в которых выполнено измерение.

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

$$\frac{\partial Y}{\partial q_i} = 0, \quad i = k, \dots, n-1; \quad (7)$$

$$q_k + \dots + q_n = 1. \quad (8)$$

Число уравнений (7) на единицу меньше числа привлекаемых к аппроксимации функций, поскольку между весами  $q_i$  существует зависимость (8).

Для решения задачи по алгоритму (3), (6) – (8) с помощью математического пакета *Maple* [5] разработана программа, которая вычисляет значения  $q_i$  и осуществляет графическое представление аппроксимирующей функции (3) в логарифмически-вероятностном масштабе.

### Результат аппроксимации

На рисунке показан набор из десяти функций логнормального распределения (функции МКРЗ), которые можно использовать в процедуре аппроксимации, а также результаты условного импакторного измерения.

Точки (результаты измерения) подобраны таким образом, что моделируют выраженное бимодальное распределение, в котором почти отсутствуют частицы в диапазоне  $d_a = 0,5 \dots 1$  мкм – об этом свидетельствует расположение двух левых точек практически на одной горизонтали.

В соответствии с местонахождением на графике экспериментальных точек, для целей аппроксимации выбраны четыре функции с номерами  $i = 6, \dots, 9$ .

Расчет по алгоритму (3), (6) – (8) в этом случае дает следующие значения весов:  $q_6 = 0,898$ ,  $q_7 = -0,779$ ,  $q_8 = 0,713$ ;  $q_9 = 0,168$ .

Аппроксимирующая кривая, соответствующая функции (3), также показана на рисунке. Видно, что кривая отражает все основные особенности экспериментального распределения.

Дозовый коэффициент аэрозоля, дисперсный состав которого соответствует этой кривой, теперь можно рассчитать по формуле (5) с использованием указанных весов и стандартных дозовых коэффициентов [2]; для  $^{239}\text{Pu}$  (см. таблицу) этот коэффициент равен:  $e(50) = (0,898 \cdot 2,0 - 0,779 \cdot 1,5 + 0,713 \cdot 1,1 + 0,168 \cdot 0,83) \cdot 10^{-5} = 1,55 \cdot 10^{-5}$  Зв/Бк.

С другой стороны, из рисунка следует, что АМАД данного аэрозоля равен 0,5 мкм, поэтому путем прямой линейной интерполяции по АМАД значений таблицы получим  $e(50) = 1,86 \cdot 10^{-5}$  Зв/Бк.

Результаты, полученные двумя различными способами довольно близки. Это объясняется весьма слабой зависимостью дозового коэффициента от АМАД в данном диапазоне диаметров, в то же время такое сходство указывает на правомерность применения предложенных методов аппроксимации и расчета к распределениям сложной формы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
2. *The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. ICRP CD-ROMS (Version One, 1999).*
3. *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66.* – 1994.
4. *Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию.* – М.: Мир, 1987. – 287 с.
5. *Дьяконов В.П. Математическая система Maple V R3/R4/R5.* – М.: СОЛОН, 1998. – 399 с.

Поступила в редакцию 09.12.05,  
после доработки – 04.02.05.

### **34 РОЗРАХУНОК ДОЗОВОГО КОЕФІЦІЄНТА АЕРОЗОЛЮ ДОВІЛЬНОЇ ДИСПЕРСНОСТІ**

**А. К. Сухоручкін**

Розроблено метод розрахунку дозового коефіцієнта аерозолю довільної дисперсності за допомогою бази даних МКРЗ. Метод ґрунтується на апроксимації довільного розподілу сумою функцій логнормального розподілу із заданими параметрами. Розрахункову процедуру реалізовано за допомогою математичного пакета Maple.

### **34 CALCULATION OF A DOSE COEFFICIENT FOR AEROSOL OF ARBITRARY DISPERSITY**

**A. K. Sukhoruchkin**

A method of calculation of a dose coefficient for aerosol of arbitrary dispersity has been developed with the help of the ICRP database. The method is based on approximation of arbitrary distribution by the sum of functions for logarithmically normal distributions with the given parameters. The computational procedure is realized with the help of the mathematical package Maple.