

Измерение транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей с помощью каскадного импактора

Предложен подход для оперативного измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей в промышленных условиях. Каскадный импактор предварительно тарируется (градуируется) в единицах транспортабельности – это предварительное однократное измерение транспортабельности на каждом каскаде импактора. После тарирования импактора в единицах транспортабельности можно многократно периодически и/или по мере необходимости измерять транспортабельность и стандартное геометрическое отклонение транспортабельности радиоактивных аэрозолей. Для этого достаточно измерить активность радионуклида на каждом каскаде импактора любым доступным способом. На основании измерений активности радионуклида на каждом каскаде импактора строится интегральная функция распределения транспортабельности для всех каскадов в процентах, затем на бумаге для

В.Э.Введенский, С.А.Сыпко

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озерск Челябинской области)

логнормальных вероятностных графиков, по оси ординат откладываются логарифмы транспортабельности каскадных элементов (но проставляются значения транспортабельности), по оси абсцисс – суммарное количество доли активности. Полученные точки определяют прямую линию $f(S)$, искомая транспортабельность – есть S_{50} , где $f(S_{50}) = 50\%$, искомое стандартное геометрическое отклонение – есть $\beta_g = S_{84}/S_{50}$, где $f(S_{84}) = 84\%$. На представленное средство измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей выдан патент на изобретение RU 2801822 C2.

Ключевые слова: транспортабельность, радиоактивные аэрозоли, стандартное геометрическое отклонение, внутреннее облучение, каскадный импактор, бумага для логнормальных вероятностных графиков, оперативное измерение, промышленные условия, диализ радиоактивного вещества через полупроницаемую мембрану, плутоний, америций, уран.

Введение

Каскадный импактор

Когда воздушный поток, содержащий аэрозоль, неожиданно изменяет направление, частицы вследствие инерции стремятся продолжить движение в прежнем направлении. Если изменение направления вызвано предметом, оказавшимся в потоке, частицы, обладающие значительным импульсом, будут соударяться с ним. Этот процесс получил название «импакция». Он широко применяется для пробоотбора аэрозолей [1]. Внешний вид каскадного импактора собственной конструкции (ЮУрИБФ) приведен на рис.1. Импактор изготовлен из нержавеющей стали. Он имеет шесть каскадов и оконечный фильтр для улавливания мелкодисперсной фракции частиц. На импактор, изображенный на рис.1, выдан патент на изобретение [2]. Импактор содержит набор каскад-пластин. В верхней и нижней частях импактора посредством резьбового соединения присоединяются штуцера. Каждая каскад-пластина состоит из пластины из нержавеющей стали с отверстиями (табл.1), и на пластине находится фильтр АФА РМП-20 с соответствующими технологическими отверстиями, совпадающими с отверстиями в каскад-пластине. В качестве последнего каскадного элемента используется фильтр АФА РСП-20.

Импактор устанавливается по месту отбора пробы, затем подключается побудитель расхода. Воздух, содержащий аэрозольные частицы, поступает в устройство через верхний штуцер и формируется в поток с заданными пространственно-скоростными параметрами. Попадая внутрь устройства, частицы аэрозоля движутся вместе с воздушным потоком с линейной скоростью, задаваемой размерами и количеством отверстий каскадов. Резкое изменение направления движения потока после прохождения потоком отверстий первого каскада приводит к тому, что в силу своей инерции наиболее массивные частицы не успевают изменить направление своего движения и осаждаются на поверхности фильтра АФА РМП-20, расположенного на первом каскаде. Далее воздушные потоки через отверстия первого каскада поступают на второй каскад, где они вновь изменяют направление и происходит инерционное осаждение следующей размерной фракции аэрозолей.

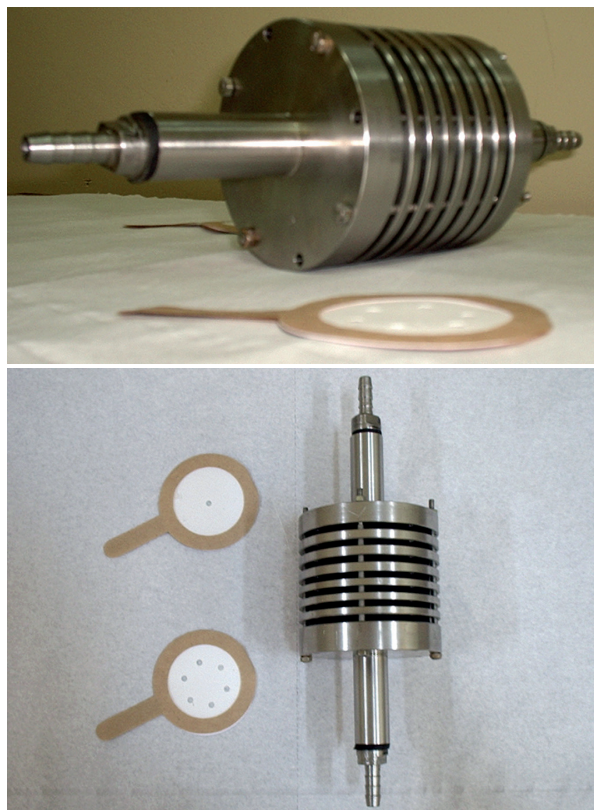


Рис.1. Внешний вид каскадного импактора ЮУрИБФ.

Табл.1. Технические характеристики импактора ЮУрИБФ.

№ каскада	Количество щелей*, шт.	Ширина щелей*, мм
I	14	4,2
II	6	4,2
III	3	4,2
IV	4	2,6
V	1	2,6
VI	6	4,2
VII	фильтр	фильтр

* в данном импакторе форма щелей круглая

И так шесть каскадов, после шестого каскада воздушный поток направляется к фильтру АФА РСП-20, оставшиеся в воздушном потоке аэрозольные частицы оседают на фильтре, после этого воздушный поток выходит через штуцер в нижней части корпуса устройства. Отбор пробы производится в зависимости от характера решаемой задачи в течение 0,5–120 часов, после чего побудитель расхода отключается.

Транспортабельность

Твердая фракция промышленных альфа-излучающих аэрозолей обладает сложным химическим составом, который определяется характером технологического процесса на участке, где проводился отбор проб аэрозольных частиц. При этом для кинетики диализа во всех исследованных ранее случаях было характерно то, что на начальной стадии, которая длилась от нескольких часов до двух суток, скорость протекания процесса растворения существенно превышала скорость, которая наблюдалась в отдаленные сроки [3-6].

Для быстрого определения относительной растворимости аэрозолей, содержащих плутоний, была разработана система, состоящая из двух мембран, между которыми помещали исследуемый фильтр, так называемый «сэндвич» (рис.2) [3]. В работе [4] для расчета относительной растворимости аэрозолей было предложено использовать формулу:

$$\vartheta = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad A_1 + A_2 \equiv 100\% .$$

В этой же работе показаны результаты определения растворимости аэрозолей, содержащих смеси диоксида Рu и диоксида U, полученных при различных температурах в различных имитантах легочной жидкости. В работе [5] было предложено понятие «транспортабельность»:

транспортабельность – есть доля вещества, находящаяся в транспортабельном состоянии. При

исследовании кинетики диализа промышленных аэрозолей через мембранные фильтры в растворе Рингера было установлено, что диализ за первые двое суток коррелирует с химическими свойствами соединений плутония, следовательно, «транспортабельность» является объективной классификацией промышленных альфа-активных аэрозолей [5]. Подробнее о транспортабельности – ниже по тексту – (3)–(6). В работе [7] была предложена методика расчета стандартной неопределенности при оценке транспортабельности производственных альфа-излучающих аэрозолей.

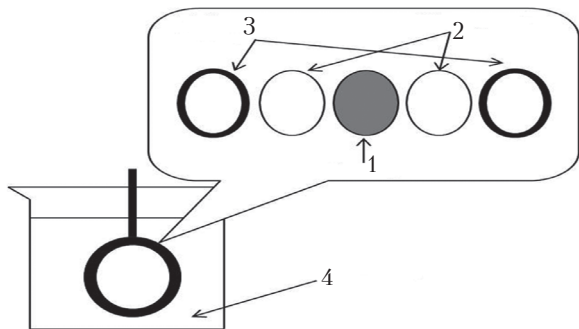


Рис.2. Схема установки для диализа в растворе Рингера, применяемая в ЮУрИБФ: 1 – фильтр; 2 – мембраны; 3 – тefлоновые кольца; 4 – раствор Рингера.

Опыт контроля радиационной обстановки и уровней облучения работников ПО «Маяк» показал, что основным дозообразующим элементом внутреннего облучения является Рu. При ингаляционном поступлении аэрозолей Рu в организм человека скорость резорбции существенно зависит от растворимости аэрозолей [8]. Растворимость аэрозолей в контексте [8] и транспортабельность – это методологически разные оценки резорбции аэрозолей в дыхательных путях. Традиционно в исследованиях ЮУрИБФ для Рu используется транспортабельность. В настоящее время методика классификации аэрозолей по их транспортабельности предполагает измерение транспортабельности радиоактивных аэрозолей в лабораторных

условиях, включающее длительную, не менее 10 суток, процедуру диализа через полупроницаемую мембрану радиоактивного вещества, содержащегося в твердой фазе аэрозоля, измерение активности получаемых при этом субстратов (диализаты, полупроницаемые мембраны, фильтр с образцом аэрозольных частиц) и расчет значения транспортабельности на основе обработки результатов измерений [9]. Недостатками этого способа являются: сложность, необходимость многодневных радиохимических анализов в лабораторных помещениях, привлечение квалифицированного персонала, большое количество измерений активности. Этот способ финансово затратен. Указанные недостатки делают его непригодным для использования в промышленных условиях.

В [10] был предложен способ определения транспортабельности путем измерения активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) аэрозолей в воздухе рабочего помещения [11]. Предварительно определяют зависимость транспортабельности радиоактивного аэрозоля от его активностного медианного аэродинамического диаметра АМАД в виде аппроксимирующей функции (рис.3), затем проводят измерения АМАД радиоактивного аэрозоля воздуха рабочего помещения и, используя полученную аппроксимирующую функцию, рассчитывают значение транспортабельности. Однако существенным недостатком этого способа является то, что при этом способе получается точечная оценка транспортабельности с неизвестными статистическими характеристиками, что ограничивает использование данной величины, в том числе в системах, использующих вероятностные методы.

Очевидно, что установленная в [10] зависимость транспортабельности от АМАД в виде:

$$S = 2,78 \cdot \text{АМАД}^{-0,71} \quad (1)$$

показывает, что транспортабельность S имеет логнормальное распределение при условии, что АМАД имеет логнормальное распределение. Это следует из определения логнормального распределения и свойств нормального распределения. Следует уточнить, что параметры 2,78 и 0,71 из (1) зависят от физико-химических свойств аэрозолей на конкретном рабочем месте, но они будут неизменны при неизменном технологическом процессе.

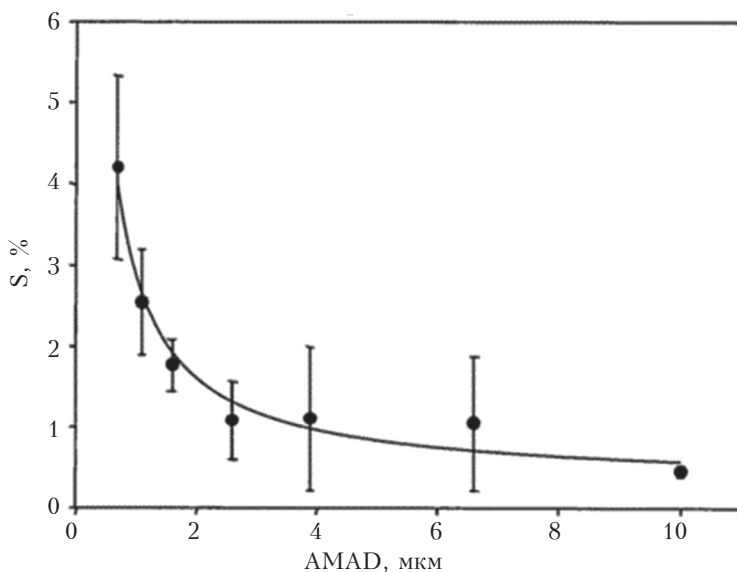


Рис.3. Зависимость диализованной доли (S , %) от АМАД аэрозолей за первые сутки диализа [10].

Предложенный в настоящей статье подход предназначен для оперативного измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей в промышленных условиях.

Материалы и методы

Средство измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей в промышленных условиях

представляет собой каскадный импактор, тарированный (градуированный) в единицах транспортабельности. Таким образом, известное устройство – каскадный импактор – применяется нестандартным способом для непосредственного измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей в промышленных условиях.

Тарирование каскадного импактора в единицах транспортабельности

Тарирование – это предварительное однократное измерение транспортабельности на каждом каскаде импактора. Измерение транспортабельности альфа-излучающих аэрозолей на каждом каскаде производится в два этапа. На первом этапе производят измерения скорости диализа изотопов плутония, америция и урана через мембранные фильтры с применением фильтр-пакетного способа [9]. На втором этапе производят непосредственное измерение транспортабельности [9].

Первый этап тарирования – измерение скорости диализа изотопов через мембранные фильтры

Фильтр с пробой аэрозоля помещают между двумя мембранными фильтрами «Владипор» типа МФАС-Б-2 (диаметр пор 0,1 мкм) в физиологическом растворе Рингера (рН = 7,3; t = 36,6 °С) (рис.2) и скрепляют между собой с помощью тefлоновых колец в виде «сэндвича». Опускают собранную конструкцию в стакан с физиологическим раствором Рингера. Через определенные интервалы времени (3 ч, 6 ч, 9 ч, 12 ч, 24 ч, 2-е, 4-е, 7-е, 14-е сутки и далее при необходимости) раствор меняют, полученный диализат сохраняют для подготовки к измерению в нем активности альфа-излучающих нуклидов. Активность радионуклидов и изотопный состав аэрозолей в диализуемой фракции и на фильтре измеряют альфа-спектрометрическим методом по результатам прямого измерения энергетических спектров альфа-излучения радионуклидов с энергиями: 5,148 МэВ ($^{239,240}\text{Pu}$); 5,489 МэВ (^{238}Pu); 5,499 МэВ (^{241}Am); изотопов U с энергиями 4,20 МэВ (^{238}U); 4,77 МэВ (^{234}U) и 4,4 МэВ (^{235}U) и меток 4,901 МэВ (^{242}Pu); 5,280 МэВ (^{243}Am) и 5,32 МэВ (^{232}U) на альфа-спектрометре [9]. Источники для альфа-спектрометрии готовят электролитическим методом после предварительного разделения изотопов Pu, Am и U на анионите AG1-4X (Bio-Rad Laboratories) с размером частиц 100–200 меш. Am подвергают дополнительной очистке от примесей изотопов Th, щелочных и щелочноземельных элементов экстракционно-хроматографическим методом на смоле DGA Normal (Triskem International). После анионообменного разделения источники Am, Pu или U готовят методом электролитического осаждения и измеряют на альфа-спектрометре [9].

Активность альфа-излучающих нуклидов Am, Pu или U в пробе диализата и/или фильтра (Q_i , Бк) рассчитывают по формулам:

$$Q_i = \frac{Q_m(N_i - N_{\phi i})}{N_M - N_{\phi M}}, \quad N_{\phi i} = N_{\phi 0} - v_M(N_i - N_{\phi i}),$$

где: Q_m – активность внесенной метки, Бк; N_i – скорость счета импульсов в области спектра альфа-излучения определяемого изотопа вместе с фоном, с^{-1} ; $N_{\phi i}$ – скорость счета импульсов «фона» альфа-спектрометра и вклада примесей метки в области спектра альфа-излучения определяемого изотопа, с^{-1} ; $N_{\phi 0}$ – скорость счета импульсов «фона» альфа-спектрометра в области спектра альфа-излучения определяемого изотопа, с^{-1} ; N_M – скорость счета импульсов в области спектра альфа-излучения метки (^{242}Pu , ^{243}Am или ^{232}U) вместе с фоном, с^{-1} ; $N_{\phi M}$ – скорость

счета импульсов «фона» альфа-спектрометра в области спектра альфа-излучения метки (^{242}Pu , ^{243}Am или ^{232}U), с^{-1} ; v_M – доля примеси определяемого изотопа, присутствующей в метке согласно Сертификату.

Активность определяемого нуклида в образце фильтра (Q , Бк) рассчитывают по формуле:

$$Q = (Q_i - Q_x),$$

где: Q_i – активность определяемого изотопа в аликвоте образца, Бк; Q_x – фоновая активность холостой пробы фильтра, Бк.

При измерении активности альфа-излучающих нуклидов в диализате и/или на фильтре учитывают уровни фоновой активности в соответствующих областях спектров, вносимые с реактивами и материалами при выполнении анализа. Фоновую активность Q_{xi} изотопов плутония, америция и урана при диализе и на фильтре контролируют по результатам анализа холостых проб (blank sample). Для этого в пробы диализатов и чистого фильтра вводят метки ^{242}Pu , ^{243}Am и ^{232}U и проводят экстракционно-хроматографическое выделение Pu, Am и U. По результатам наборов альфа-спектров, испускаемых источниками, приготовленными электролитическим методом, рассчитывают скорости счета и фоновую активность Q_{xi} в областях регистрации $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am и изотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , содержащихся в диализате и/или на фильтре, по формуле:

$$Q_{xi} = \frac{Q_m (N_{xi} - N_{\phi i})}{N_M - N_{\phi M}},$$

где: N_{xi} – скорость счета импульсов в областях регистрации i изотопа – $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am и изотопов U, полученная при измерении «холостых» проб, с^{-1} ; $N_{\phi i}$ – скорость счета импульсов фона альфа-спектрометра и вклада импульсов от примесей метки в области спектра альфа-излучения определяемого изотопа, с^{-1} .

Расчет диализуемой фракции D_i $^{238,239}\text{Pu}$, ^{241}Am и изотопов U в долях от суммарной активности каждого изотопа, содержащегося в диализате, мембранах и на фильтре с учетом уровней фоновой активности изотопов, выполняют по формуле:

$$D_i = \frac{Q_{d_i}}{\sum Q_{d_i} + Q_m + Q_f} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: Q_{d_i} – активность изотопа в диализате за i -й промежуток времени диализа, Бк; Q_m – активность изотопа на мембранах за все время проведения диализа, Бк; Q_f – активность изотопа, оставшаяся на исследуемой части аэрозольного фильтра после окончания диализа, Бк.

Второй этап тарирования – измерение транспортабельности

По окончании измерений по формуле (2) рассчитывают D_i диализуемую фракцию $^{238,239}\text{Pu}$, ^{241}Am и изотопов U в долях от суммарной активности каждого изотопа, содержащейся в диализате, мембранах и на фильтре, с учетом уровней фоновой активности $^{238,239}\text{Pu}$, ^{241}Am и изотопов U за каждый i -й промежуток времени (за 3, 6, 9, 12, 24 часа, 2 суток и далее).

В рамках классической теории транспортабельности [6] наблюдаемая двухстадийная кинетика диализа объясняется тем, что твердая фаза аэрозоля представлена двумя фракциями: транспортабельной и медленной (нетранспортабельной). Транспортабельная фракция практически мгновенно покидает твердую фазу и перемещается в раствор, будучи заведомо готовой к этому. Затем происходит диффузия радиоактивного вещества через мембрану. Нетранспортабельная фракция отвечает медленному переходу радиоактивного вещества из твердой фазы в жидкость

путем диссоциации или образования кластеров. Скорость данного перехода определяется химической природой поверхности твердой фазы и физическими процессами, протекающими в ее приповерхностном слое. Математически этот процесс описывается уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= -\lambda_1 Q_1 + \lambda_2 Q_2 \\ \frac{dQ_2}{dt} &= -\lambda_2 Q_2 \end{aligned} \quad (3)$$

где: Q_1 – активность транспортабельной фракции, Бк; Q_2 – активность нетранспортабельной фракции, Бк; λ_1 – скорость убывания транспортабельной фракции за счет быстрой диффузии вещества во внешний раствор, сут⁻¹; λ_2 – скорость перехода вещества в пробе в транспортабельное состояние за счет растворения и разрушения крупных частиц, сут⁻¹.

Первое уравнение описывает диффузию во внешний раствор транспортабельной фракции, и пополнение ее за счет медленного перехода радиоактивного вещества из твердой фазы в жидкость. Последний процесс описывается вторым уравнением. Принимая начальное содержание радиоактивного вещества на фильтре равным Q_0 , а долю активности радионуклида, находящуюся в транспортабельном состоянии, равной S , можно сформулировать начальные условия вида:

$$\begin{aligned} Q_1|_{t=0} &= Q_0 S \\ Q_2|_{t=0} &= Q_0 (1 - S) \end{aligned} \quad (4)$$

Решая уравнение (3) при начальных условиях (4), можно получить выражение, которое описывает активность аэрозольных частиц, находящихся на фильтре $Q(t)$, в зависимости от продолжительности процесса диализа следующего вида:

$$Q(t) = Q_1 + Q_2 = Q_0 [a_1 e^{-\lambda_1 t} + a_2 e^{-\lambda_2 t}], \quad a_1 + a_2 \equiv 1, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > 0. \quad (5)$$

Из (3)–(5) получаем долю активности радионуклида, находящуюся в транспортабельном состоянии, т. н. транспортабельность:

$$S = a_1 + \frac{a_2 \lambda_2}{\lambda_1}, \quad a_1 + a_2 \equiv 1, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > 0. \quad (6)$$

Введем переменную $a \equiv a_1$. Поиск значений параметров a , λ_1 и λ_2 проводится численным методом путем минимизации функционала вида:

$$\sum_{i=1}^I (Q_i - Q_0 [a e^{-\lambda_1 t} + (1-a) e^{-\lambda_2 t}])^2 \xrightarrow{a, \lambda_1, \lambda_2} \min, \quad (7)$$

где: Q_0 – начальное содержание радиоактивного вещества на фильтре, Бк; Q_i – активность радионуклида, содержащегося на фильтре после i -го шага процедуры диализа, Бк.

Затем полученные в (7) значения a , λ_1 и λ_2 подставляем в (6) и получаем искомую транспортабельность S для соответствующего каскада импактора.

Оперативное измерение транспортабельности и стандартного геометрического отклонения в промышленных условиях

После тарирования каскадного импактора в единицах транспортабельности можно многократно периодически и /или по мере необходимости измерять транспортабельность и стандартное геометрическое отклонение транспортабельности радиоактивных аэрозолей. Для этого достаточно измерить радиоактивность радионуклида на каждом каскаде импактора любым доступным способом. На основании измерений радиоактивности радионуклида на каждом каскаде импактора строится интегральная функция распределения транспортабельности для n -го каскада в % по формуле:

$$f((S)_n) = 100\% \cdot \sum_{i=1}^n A_i / \sum_{i=1}^N A_i, n \in \{1, \dots, N\},$$

где: N – всего каскадов; $A_i, i \in \{1, \dots, N\}$ – измеренная радиоактивность на i -м каскаде, c^{-1} ; $(S)_n, n \in \{1, \dots, N\}$ – предварительно однократно измеренное значение транспортабельности на n -м каскаде, %; $f((S)_n), n \in \{1, \dots, N\}$ – суммарное количество доли активности на n -м каскаде (аппроксимация интегральной функции распределения транспортабельности), %.

Ранее было показано, что транспортабельность имеет логнормальное распределение, поэтому на бумаге для логнормальных вероятностных графиков [12] по оси ординат откладываются логарифмы транспортабельности каскадных элементов $\log_{10}((S)_n), n \in \{1, \dots, N-1\}$ (но проставляются значения транспортабельности $(S)_n$). По оси абсцисс – суммарное количество доли активности $f((S)_n), n \in \{1, \dots, N-1\}$ откладываются в логарифмически-вероятностной шкале как интегральную функцию распределения транспортабельности. Точка N на графике не отмечается. Полученные точки определяют прямую линию $f(S)$, искомое значение транспортабельности есть S_{50} , где $f(S_{50}) = 50\%$, искомое стандартное геометрическое отклонение – есть $\beta_g = S_{84}/S_{50}$, где $f(S_{84}) = 84\%$.

Как указано в [1] АМАД и, следовательно, транспортабельность не всегда имеет логнормальное распределение (точки не «выстраиваются» в линию на бумаге для логнормальных вероятностных графиков). В этом случае для определения моды и стандартного геометрического отклонения предлагается использовать другие методы, например, схемы итеративного расчета [1].

Результат и обсуждения

Однократное тарирование каскадного импактора в единицах транспортабельности происходит следующим образом.

1) Для примера возьмем каскадный импактор ЮУрИБФ [2] (рис.1). Импактор устанавливается по месту отбора пробы, затем подключается побудитель расхода. Отбор пробы производится в зависимости от характера решаемой задачи в течение 0,5–120 часов, после чего побудитель расхода отключается. Импактор разбирается: верхняя часть корпуса отсоединяется, с каскадов снимаются фильтры АФА РМП-20 с осевшими аэрозолями и оконечный фильтр АФА РСП-20.

2) На каждом фильтре АФА РМП-20 и оконечном фильтре АФА РСП-20 измеряется транспортабельность аэрозолей как описано выше по тексту. Измерение транспортабельности занимает от 10 суток и требует использования дорогостоящих химических реактивов.

3) Измеренные в пункте 2) транспортабельности аэрозолей на фильтрах АФА РМП-20, АФА РСП-20 приписываются каскадам, на которых стояли эти фильтры, – это и есть тарирование импактора в единицах транспортабельности.

Тарирование импактора занимает более 10 суток. Измерять транспортабельность аэрозолей на фильтрах с разных каскадов можно параллельно. При переносе импактора в другое место необходимо тарирование импактора повторить. При установке импактора стационарно тарирование следует повторять с периодичностью смены техпроцесса. Иногда техпроцесс не меняется годами. После того, как тарирование импактора произведено, измерение транспортабельности и стандартного геометрического отклонения сводится к измерению активности, накопленной на фильтрах АФА РМП-20 и оконечном фильтре АФА РСП-20 с помощью спектрометрических или радиометрических приборов и нанесение точек на логнормальную вероятностную бумагу.

Табл.2. Предварительное однократное измерение транспортабельности, измерения активности радионуклида ²³⁹Pu, интегральная функция распределения.

Каскадный элемент импактора (каскад) n	Предварительное однократное измерение транспортабельности на каскадном элементе импактора (каскаде) $(S)_n, \%$	Радиоактивность на каскадном элементе импактора (каскаде) A_n, c^{-1}	Интервал транспортабельности, %-%	Суммарное количество доли активности (аппроксимация интегральной функции распределения транспортабельности) для n -го каскада, $f((S)_n), \%$
1	0,54	5	0,54–0,00***	0,99
2	0,89	10	0,89–0,54	2,97
3	1,27	35	1,27–0,89	9,90
4	1,70	70	1,69–1,27	23,76
5	2,78	190	2,78–1,69	61,39
6	5,00	60	5,00–2,78	73,27
7	6,00	85	6,00–5,00	90,10
8*	10,00**	50	10,00–6,00	100**

* на последнем каскаде импактора стоит окончательный фильтр;

** данная точка на графике (рис.4) не отмечается;

*** значение 0,00% – минимальное теоретическое значение транспортабельности.

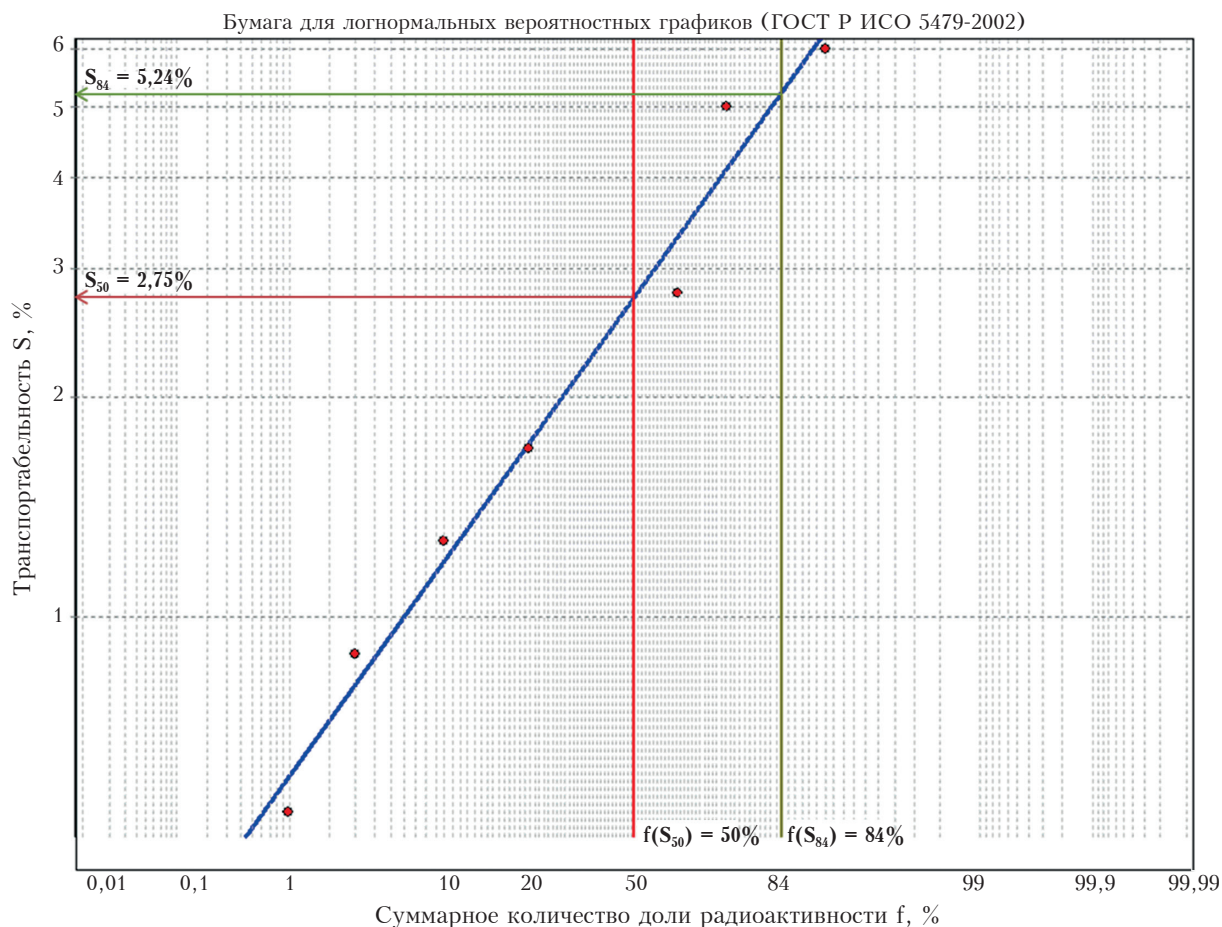


Рис.4. Графическое решение примера, представленного в табл.2.

Пример осуществления измерения транспортабельности на одном из рабочих мест ПО «Маяк». Исходные данные для примера приведены в табл.2. Графическое решение приведено на рис.4.

Результат: искомое значение транспортабельности $S_{50} = 2,75\%$, искомое стандартное геометрическое отклонение $\beta_g = S_{84}/S_{50} = 5,24\%/2,75\% = 1,9$.

Выводы

1. Измерена транспортабельность со стандартным геометрическим отклонением транспортабельности радиоактивных аэрозолей.
2. Измерять транспортабельность и стандартное геометрическое отклонение транспортабельности радиоактивных аэрозолей можно в промышленных условиях.
3. Использован каскадный импактор для прямого измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей.
4. Впервые тарирование каскадного импактора произведено в единицах транспортабельности.
5. Измерение транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей производится без дополнительных временных и материальных затрат в сравнении с точечной оценкой из [10] и с экономией времени и материальных затрат более чем в 50–100 раз в сравнении с точечной оценкой из [9].
6. На представленное средство измерения транспортабельности и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей выдан патент на изобретение [13].

Литература

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Мир, 1987, 280 с.
2. Патент на изобретение RU 2780177. Каскадный импактор.
3. J.J. Miglio, B.A. Muggenburg, A.L. Brooks, «A Rapid Method for Determining the Relative Solubility of Plutonium Aerosols», *Health Phys.*, no. 33, pp. 449-457, 1977.
4. A.F. Eidson, J.A. Mewhinney, In Vitro Dissolution of Respirable Aerosols of Industrial Uranium and Plutonium Mixed-Oxide Nuclear Fuels», 1981. – Washington, D. C. : Division of Health, Siting, and Waste Management, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C. : GPO Sales Program, Division of Technical Information and Document Control, U.S. Nuclear Regulatory Commission Springfield, Virginia. : National Technical Information Service. – 13 p.
5. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Цевелева И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 1998. № 4. С. 14-45.
6. Аладова Е.Е., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Жданов А.Н., Мелентьева Р.В., Сыпко С.А., Хохряков В.В. Физико-химические характеристики промышленных альфа-излучающих аэрозолей: данные многолетних исследований. Монография. СПб.: Научное издание, 2023. 382 с.
7. Сыпко С.А., Введенский В.Э., Ишунина М.В., Сулова К.Г. Метод косвенного расчета стандартной неопределенности при оценке транспортабельности производственных альфа-излучающих аэрозолей // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 1. С. 75-81.
8. ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44 (2).
9. Методика измерений альфа-активности радионуклидов (изотопы плутония, урана, америция) в диализате, мембранных фильтрах, аэрозольном фильтре альфа-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений 222.0228/RA.RU.311866.2018. Разработана ФГУП ЮУрИБФ. Содержається в документе организации «Методика определения транспортабельности промышленных альфа-излучающих аэрозолей». 2018. 40 с.
10. Патент на изобретение RU 2650487 С2. Способ определения транспортабельности радиоактивных аэрозолей.
11. Методика измерений альфа-активности радионуклидов (изотопы плутония, урана, америция) на аэрозольном фильтре альфа-спектрометрическим методом. Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений № 222.0141/RA.RU.311866.2020. Разработана ФГУП ЮУрИБФ. Содержається в документе организации «Методика определения АМАД промышленных альфа-излучающих аэрозолей». 2020. 38 с.
12. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
13. Патент на изобретение RU 2801822 С2. Способ для определения медианного значения и стандартного геометрического отклонения транспортабельности радиоактивных аэрозолей.

Measuring Transportability and Standard Geometric Deviation of Transportability of Radioactive Aerosols Using a Cascade Impactor

Vvedensky Vladimir, Sypko Sergey

(Southern Urals Biophysics Institute, Chelyabinsk region, Ozyorsk, Russia)

Abstract. An approach is proposed for the operational measurement of transportability and standard geometric deviation of transportability of radioactive aerosols in industrial conditions. The cascade impactor is preliminarily calibrated (graduated) in transportability units - this is a preliminary single measurement of transportability at each impactor cascade. After calibrating the impactor in transportability units, the transportability and standard geometric deviation of the transportability of radioactive aerosols can be repeatedly measured periodically and/or as needed. To do this, it is enough to measure the activity of the radionuclide at each impactor cascade using any available method. Based on measurements of radionuclide activity at each impactor cascade, an integral transportability distribution function is constructed for all cascades in percentage, then on paper. For lognormal probability graphs, the logarithms of the transportability of the cascade elements are plotted along the ordinate axis (but transportability values are indicated), and the total amount of the fraction activity is plotted along the abscissa axis. The obtained points determine the straight line $f(S)$, the required transportability is S_{50} , where $f(S_{50}) = 50\%$, the desired standard geometric deviation is $\beta_g = S_{84}/S_{50}$, where $f(S_{84}) = 84\%$. A patent for the invention RU 2801822 C2 was issued for the presented means of measuring transportability and standard geometric deviation of transportability of radioactive aerosols.

Key words: *transportability, radioactive aerosols, geometric standard deviation, internal irradiation, cascade impactor, paper for lognormal probability graphs, operational measurement, industrial conditions, dialysis of a radioactive substance through a semipermeable membrane, plutonium, americium, uranium.*

В.Э. Введенский (вед. прогр.), С.А. Сытко (зав. лаб.) – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озерск Челябинской области).

Контакты: тел. +7 (351) 302-94-59; e-mail: vvedensky@subi.su.