

# О точности измерения импактором параметров распределения размеров

В. И. БАДЬИН, Ю. К. МОЙСЕЕВ, З. Г. БАТОВА

УДК 541.182

Среди радиоактивных аэродисперсных систем особое место по радиационной опасности занимают грубо-дисперсные α-активные аэрозоли. В большинстве они относятся к потенциально опасным аэрозолям, формирующим радиационные нагрузки в течение большого промежутка времени. Расчет доз базируется на биофизической модели, где важнейшую роль играет дисперсность аэрозольных частиц [1], определяемая различными методами, в том числе импакторами [2]. Практический интерес к последним обусловлен их быстротой и простотой, поскольку многокаскадный импактор (инерционный осадитель) позволяет проводить весь анализ за несколько десятков минут.

Кроме того, этот прибор, проградуированный по калибровочному аэрозолю с плотностью частиц  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ , дает возможность получить результаты измерения размеров пылинки непосредственно в единицах так называемого приведенного седиментационного (аэродинамического) радиуса. Для частиц, форма которых не слишком отличается от сферической, аэродинамический радиус совпадает с приведенным радиусом, равным  $r \sqrt{\rho}$ . Это позволяет калибровать импактор на любом аэрозоле с известной плотностью. Таким образом, дисперсность аэрозоля, измеренная импактором, может быть выражена в аэродинамических размерах частиц, функцией которых являются различные коэффициенты задержки пыли в органах дыхания [3], что избавляет от необходимости определения плотности и формы исследуемых пылинки.

Градуировка импактора для неактивных аэрозолей состоит в определении медианного радиуса  $r_m$  счетного распределения размеров калибровочных аэрозольных частиц, оседающих на каждом из каскадов [4]. К сожалению, счетная медиана размеров частиц, задержанных на каскаде, зависит как от входного счетного спектра размеров  $f(r)$ , так и от эффективности осаждения  $\Xi(r)$ . Такая же неопределенность возникает при калибровке по активным аэрозолям, в процессе которой определяют медианный радиус по активности  $r_{am}$ .

В осадках на каскадах чаще всего наблюдается лог-нормальное распределение размеров радиоактивных частиц, поскольку счетное и активное распределения обычно подчиняются этому закону [5]. Для  $n$ -каскадного импактора уравнение, связывающее среднегеометрический радиус по активности измеряемой пыли  $r_{ag} = r_{am}$  со среднегеометрическими радиусами  $r_{agi}$  соответствующих разделенных фракций, имеет вид

$$r_{ag} = \prod_{i=1}^n r_{agi}^{g_{ai}}, \quad (1)$$

где  $g_{ai}$  — доля активности исследуемой пыли, осевшей на  $i$ -м каскаде. Обозначая  $\bar{r}_{agi}$  среднегеометрический радиус по активности частиц калибровочного аэрозоля, задержанных на этом каскаде, и учитывая, что  $r_{agi} = P_i \bar{r}_{agi}$ , получаем

$$r_{ag} = P r_{ago}, \quad (2)$$

где  $r_{ago}$  — среднегеометрический радиус измеряемого аэрозоля, который получен с помощью импактора, отградуированного по общепринятой методике;  $P =$

$\prod_{i=1}^n P_i^{g_{ai}}$  — поправочный коэффициент, учитывающий неточность калибровки для аэрозоля в целом;  $P_i$  — поправочный коэффициент, учитывающий переход от калибровочного спектра к спектру размеров исследуемых частиц, осевших на  $i$ -м каскаде. Ориентировочный коэффициент  $P_i$  максимально отличается от единицы для конечных каскадов и в случае соответствия каскадов радиусам, лежащим между активными модами исследуемого  $r_a$  и калибровочного  $\bar{r}_g$  аэрозоля. Причем  $P_i > 1$ , если  $\bar{r}_a < r_a$  и  $\bar{r}_{ag} \beta_g^{-\ln \beta_g} < r < r_{ag} \beta_g^{-\lg \beta_g}$ , и  $P_i < 1$ , если  $\bar{r}_a > r_a$  и  $r_{ag} \beta_g^{-\lg \beta_g} < r < \bar{r}_{ag} \beta_g^{-\lg \beta_g}$ . Здесь  $\beta_g$  и  $\bar{\beta}_g$  — стандартные геометрические отклонения исследуемой и калибровочной пыли;  $\bar{r}_{ag}$  — активный среднегеометрический радиус калибровочных аэрозольных частиц. Для распространенных генераторов аэрозолей ( $\bar{r}_{ag} = 1 \text{ мк}$ ) и грубодисперсной пыли ( $r_{ag} \approx 20 \text{ мк}$ ) приближенно  $1 < P \leq 3$ . Следовательно, импактор является прибором, обладающим «ходом с дисперсностью».

На практике наблюдается значительное самопоглощение α-излучения в аэрозольных частицах, пропорциональное радиусу пылинки и достигающее для спектров, усредненных при продолжительном отборе пробы воздуха, размеров 2–4 крат [6]. Если обозначить поправку на самопоглощение α-излучения для всего спектра размеров  $X = 1/\eta_0$ , а долю определенной радиометрически (без учета самопоглощения) активности, осевшей на  $i$ -м каскаде,  $g_{ai}^0$ , то уравнение, связывающее истинные и измеренные характеристики, имеет вид

$$\Phi(\xi) = 2 \frac{\sum_{i=1}^k g_{ai}^0}{X} - 1,$$

где  $\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\xi e^{-\xi^2/2} d\xi$  — интеграл вероятности;

$\xi = \frac{\lg r - \lg r_{ag}}{\lg \beta_g}$ ;  $\beta_g$  — стандартное геометрическое отклонение для реального распределения размеров;  $\eta_0$  — доля излучения, испускаемого всеми аэрозольными частицами в совокупности;  $k \leq i_{\text{макс}} - 1$ .

Обычно активное распределение размеров, получаемое при помощи импактора,  $g_a^0(r)$  приближенно описывается лог-нормальным законом. Тогда уравнение (2) переходит в  $\Phi(\xi) \approx \frac{1 + \Phi(\xi^0)}{X} - 1$  при

$$\Phi(\xi) < \frac{2-X}{X} \text{ и } \Phi(\xi^0) < \frac{2(Y-X)}{Y-1} - 1, \quad (3)$$

где  $\xi^0 = \frac{\lg r - \lg r_{ag}^0}{\lg \beta_g^0}$ ;  $\beta_g^0$  — стандартное геометрическое отклонение распределения  $g_a^0(r)$ ;  $Y =$

Сравнительные результаты определения дисперсности грубодисперсных  $\alpha$ -активных аэрозолей прямым автордиографическим методом и импактором

Способ определения	Параметры активного распределения размеров и поправки	Номер опыта			Средние значения	Примечания
		1	2	3		
Применение импактора	Активный среднегеометрический радиус $r_{ag}^0, мк$	1,8	1,2	1,8	1,6	Без введения поправок
	Стандартное геометрическое отклонение $\beta_g^0$	3,2	3,1	3,2	3,2	То же
	$X_i$ $\bar{K}_i$ $\Phi_i$	2 2,5 10	2 1,9 7,6	4 5,7 23	— — —	} Определено из опыта по растворению аэрозольных частиц ( $P=2$ )
	Активный аэродинамический среднегеометрический радиус $r_{ag}, мк$	18	9	41	23	
Прямой автордиографический метод	Активный аэродинамический среднегеометрический радиус $r_{ag}, мк$	22	12	50	28	Автордиография показала, что активность частиц пропорциональна $r^3$ ; расчет по измеренному $r_g$ по формуле $r_{ag} = r_g \beta_g^3 \ln \beta_g$
	Стандартное геометрическое отклонение $\beta_g$	2	2,9	2,8	2,9	Непосредственное измерение

$$= \frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} g_{ai}^0}{g_{ai_{\max}}^0} - \text{поправка на самопоглощение для каскада с индексом } i_{\max} \text{ в предположении, что самопоглощение существенно только для этого каскада.}$$

Решая уравнение (3) относительно  $r_{ag}$  и  $\beta_g$  для нескольких пар значений  $r$  и реальных  $X$ ,  $r_{ag}^0$  и  $\beta_g^0$ , найдем средние [из-за приближенного характера соотношения (3)] величины  $r_{ag}$ , выраженные в единицах  $r_{ag}^0$ ,  $K = r_{ag} / r_{ag}^0 = 2 \div 6$  для  $X = 2 \div 4$ .

Среднегеометрический аэродинамический радиус по активности, определенный при помощи импактора без учета поправок  $P$  и  $K$ , оказывается для грубодисперсной пыли заниженным в 4—12 раз. Сопоставление экспериментальных данных о дисперсности  $\alpha$ -активных аэрозолей, полученных путем применения автордиографии [7] и импактора, подтвердило большое различие результатов (см. таблицу). Импактор калибровался на неактивных полидисперсных аэрозолях с  $\rho = 4 \text{ г/см}^3$ . На оптическом микроскопе находили счетное распределение размеров для каждого каскада, затем переходили к весовому распределению  $g_D(r)$ , откуда определялось  $r_{ag}$ . Несоответствие величин  $r_{ag}$  и  $r_{ag}^0$  легко объясняется вышеизложенными причинами. Пос-

ле введения поправки данные, полученные разными методами, совпали в пределах точности расчета и эксперимента.

Известно, что при помощи импактора не представляется возможным осадить на разные каскады частицы размером меньше 0,4—0,8 мк. Однако даже в тонком, но полидисперсном аэрозоле могут присутствовать более грубые, еще разделяемые на фракции пылинки (их относительная доля определяется величинами  $\eta_g$  и  $\beta_g$ ). Как показал опыт, для лог-нормального активного распределения размеров однородных аэрозольных частиц предельно измеряемая инерционным осадителем величина  $r_{ag} = 0,1 \div 0,5 \text{ мк}$ . Стандартное геометрическое отклонение в большинстве случаев ограничено интервалом  $2 < \beta_g < 3$ . Соответствующие предельные значения счетных среднегеометрических радиусов, рассчитанные из соотношения  $r_g = r_{ag} \beta_g^{-3} \ln \beta_g$ , находятся в диапазоне  $3 \cdot 10^{-3} - 0,1 \text{ мк}$ . Следовательно, импактором можно пользоваться при определении дисперсности мелкодисперсных радиоактивных аэрозолей, если заранее известен тип асимметричного распределения размеров исследуемых частиц.

Погрешность расчета радиационных нагрузок кроме рассмотренной точности определения  $r_{ag}$  сильно зависит от формы кривой задержки активности  $K_a^{\text{общ}}(r_{ag})$  в легких. В этом смысле кривая  $K_a^{\text{общ}}(r_{ag})$  может быть

разделена на три участка. При  $r_{ag} < 0,1$  мк существующие в настоящее время импакторы неприемлемы. В диапазоне  $0,1 \text{ мк} \leq r_{ag} \leq 1,5 \text{ мк}$  величина  $K_a^{обш}$  ( $r_{ag}$ )  $\approx \text{const}$  на 20—30% и для  $\bar{K} = 1$  неточность расчета  $K_a^{обш}$  при использовании  $r_{ag}^0$  не превосходит 20—30%. Если  $\varphi = 12$ , то ошибка возрастает и для  $r_{ag} > 0,5$  мк достигает нескольких сот процентов. При  $r_{ag} > 1,5$  мк  $K_a^{обш}$  изменяется от 20—30% до 0. Здесь обуславливаемые погрешности особенно значительны.

В рассмотренном диапазоне измерений поправок  $P$  и  $K$  игнорирование ошибок определения дисперсности активной пыли влечет за собой при оценке радиационной опасности вдыхания грубодисперсных аэрозолей согласно модели Морроу завышение накопления  $\alpha$ -активных веществ в легких в 2—10 раз.

Поступило в Редакцию 24/VII 1970 г.  
В окончательной редакции 27/XI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Моггюв. Health Phys., 12, 173 (1966).
2. К. Спурный и др. Аэрозоли. М., Атомиздат, 1964, стр. 130.
3. В. И. Бадьин. «Гигиена и санитария», № 10, 52 (1969).
4. Н. А. Фукс. Успехи механики аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 54.
5. Г. М. Пархоменко и др. В кн. «Всесоюзная научно-техническая конференция «XX лет производства и применения изотопов и источников ядерных излучений в народном хозяйстве СССР». М., Атомиздат, 1968, стр. 73.
6. В. И. Бадьин. В сб. «Новости науки и техники». Вып. 4. Аэрозоли. М., Изд. ЦНИИАтоминформ, 1969, стр. 4.
7. В. И. Бадьин, Р. Я. Ситыко. В кн. «Дозиметрические и радиометрические методики». М., Атомиздат, 1966, стр. 166.

## Структура магнитного поля трехзаходного стелларатора-торсатрона «Сатурн-1»

В. С. ВОЙЦЕНА, А. В. ГЕОРГИЕВСКИЙ, В. Е. ЗИСЕР, Д. П. ПОГОЖЕВ, С. И. СОЛОДОВЧЕНКО, В. А. СУПРУНЕНКО, В. Т. ТОЛОК

УДК 621.039.623

Трехзаходный стелларатор-торсатрон «Сатурн-1» предназначен для исследования свойств магнитного поля, созданного при помощи внешних по отношению к рабочему объему обмоток различного типа, и для экспериментальной проверки влияния этих свойств на удержание плазмы.

Основные параметры установки (рис. 1): напряженность продольного магнитного поля в квазистационарном режиме  $H_0 \approx 6$  кэ; в импульсном режиме  $H_0 \geq 10$  кэ; большой радиус тороидальной винтовой обмотки  $R = 35,6$  см; малый радиус  $a = 10$  см; число периодов поля  $m = 8$ .

Предусмотрено два режима работы установки: стеллараторный и торсатронный, впервые предложенный В. Ф. Алексиним и в дальнейшем рассмотренный другими авторами [1]. Система винтового магнитного поля выполнена в виде двух независимых обмоток, объединяющих полюсы с одинаковыми направлениями токов. В торсатронном режиме включается одна обмотка. Продольное магнитное поле  $H_\phi$  создается специальной обмоткой (см. рис. 1). В зависимости от направления оно либо суммируется с продольным полем  $H_{\phiв}$ , создаваемым в торсатронном режиме винтовой обмоткой, либо вычитается из него. Соотношение этих полей

характеризуется коэффициентом  $K_\phi = \frac{H_{\phiв}}{H_0}$ , где  $H_0 = H_{\phiв} + H_\phi$ . Имеются также обмотки, с помощью которых создается поперечное к плоскости тора магнитное поле: компенсирующее  $H_{\text{КОМ}}$  — для торсатронного режима [1] и корректирующее  $H_{\text{КОР}}$  — для создания «магнитной ямы» [2]. Максимальная неоднородность поперечного поля в рабочем объеме 5%.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию магнитных поверхностей стелларатора в торсатронном режиме. Магнитные измерения проводились при  $H_0 = 0,5 \div 1$  кэ в широком диапазоне изменения  $k_\phi$ .

Для исследования магнитных поверхностей (см. рис. 1) были использованы низкоэнергетичные (20÷50 эв) электронные пучки [3], создаваемые электронной пушкой, которая могла перемещаться по радиусу в горизонтальном и вертикальном направлениях. Область существования замкнутых магнитных поверх-

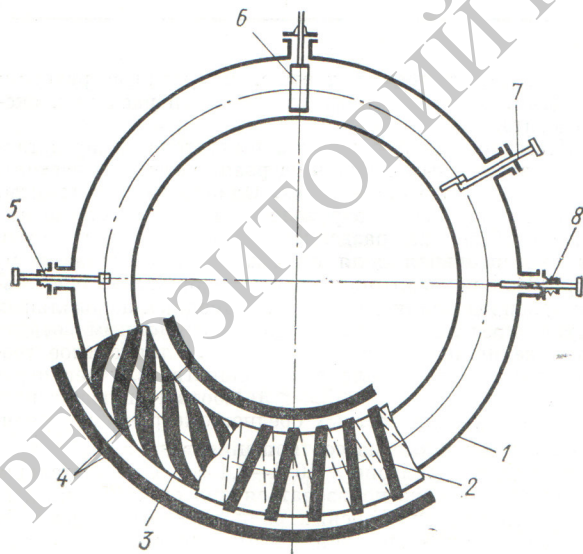


Рис. 1. Схема установки «Сатурн-1»:

1 — вакуумная камера; 2 — обмотка продольного магнитного поля; 3 — винтовая обмотка; 4 — обмотка поперечного магнитного поля; 5 — электронная пушка; 6 — кольцевой зонд; 7 — вращающийся зонд; 8 — локальный зонд.