

Оценка пылеемкости каскада импактора

Рассмотрен случай изменения характеристик каскадов импактора при длительном пробоотборе в условиях сильной запыленности: изменение значений D_{50} каскадов вследствие нарастания осадка из нерадиоактивной пыли на подложках и изменения расстояния «коллектор–сопло» (что может привести к ошибкам при расчете АМАД). Рассчитана предельная высота осадка из аэрозольных частиц на подложке, при которой отклонение от номинального значения D_{50} каскада не превысит 23%. Оценка формы и объема осадка выполнена с помощью CFD-моделирования. Рассчитано допустимое время отбора пробы при заданных характеристиках аэрозоля.

В статье не рассматривается влияние запыленности на изменение аэродинамического сопротивления импактора при длительном отборе пробы, а также неопределенности при измерении суммарной активности альфа-излучающих р/н вследствие неравномерного самопоглощения альфа-частиц по каскадам.

Ключевые слова: импактор, пылеемкость, аэрозоль, дисперсность, пробоотбор.

А.Г.Цовьянов, А.Е.Карев

(ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г.Москва)

Импакторы – селективные пробоотборные устройства, в которых разделение частиц пыли на размерные фракции происходит за счет инерционного осаждения на препятствиях (коллекторных пластинах). Импакторы применяются в практике радиационного контроля воздушной среды с целью получения данных о дисперсности радиоактивных аэрозолей (АМАД и β_g).

Продолжительность отбора пробы с помощью импактора с сохранением заданных характеристик каскадов будет зависеть от:

- 1) предельной пылеемкости каскадов данного импактора;
- 2) массовой концентрации аэрозоля;
- 3) ММАД (массовый медианный аэродинамический диаметр) аэрозоля;
- 4) объемного расхода, при котором ведется отбор пробы.

Под пылеемкостью понимают вес пыли, которую пылеотделительное устройство способно поглотить в процессе непрерывной работы, сохраняя в допустимых пределах величины эффективности пылезадержания и аэродинамического сопротивления [3]. Применительно к импактору эту формулировку можно изложить в следующем виде: под пылеемкостью импактора понимают количество пыли, которую импактор способен поглотить в процессе непрерывной работы, сохраняя в допустимых

пределах установленные значения эффективных диаметров отсечки D_{50} каждого из каскадов. В данной работе предпринята попытка разработать алгоритм оценки массы осадка из осажденных на коллекторной пластине импактора аэрозольных частиц, который образуется при его длительной эксплуатации.

Алгоритм расчета

Процесс длительного накопления аэрозольных частиц на каскадах импактора может приводить к нежелательному изменению его пробоотборных характеристик. Из теории известно, что эффективность осаждения частиц зависит от отношения расстояния между срезом сопла и коллекторной плоскостью к диаметру сопла S/W [2]. Данное отношение для круглого сопла должно быть больше единицы, невыполнение этого условия приводит к отклонению величины эффективного каскадного аэродинамического диаметра отсечки D_{50} от заданного (до 30%), т. е. к изменению характеристик отбираемых фракций частиц.

Снимок коллекторной пластины последнего каскада импактора [6] с иглообразным осадком представлен на рис.1а,б ($D_{50} = 0,3$ мкм). Импактор был установлен в отделении мойки деталей Субликатного завода АО «СХК».

Известно, что кривая эффективности осаждения частиц на коллекторной пластине импактора может быть аппроксимирована логистической функцией [1]:

$$\varepsilon_1(x) = \frac{\exp(a_1 + b_1 x)}{1 + \exp(a_1 + b_1 x)}, \quad (1)$$

где x – аэродинамический диаметр частиц, мкм; a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Тогда, предполагая, что распределение массы частиц, поступающих в импактор, подчиняется логнормальному закону, получаем формулу для распределения частиц, осажденных на коллекторной пластине первого каскадного элемента:

$$z_1(x) = \varepsilon_1(x) \cdot f(x), \quad (2)$$



Рис.1а. Иголообразный осадок на последнем каскаде импактора.

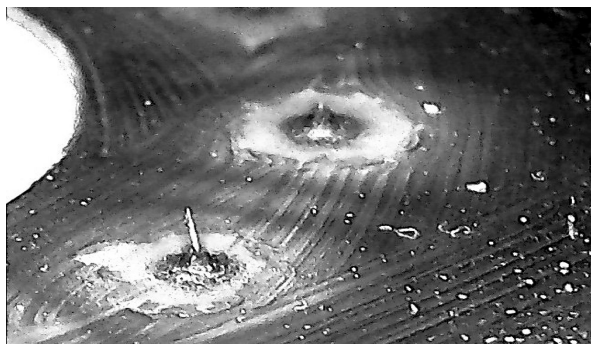


Рис.1б. Снимки иглообразных осадков на последнем каскаде с помощью цифрового светодиодного микроскопа Gaosuo $\times 1000$.

где $f(x)$ – функция плотности логнормального распределения (ЛНР), которая имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \ln \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \ln(\text{MMAD}))^2}{2 \ln^2 \sigma}} \quad (3)$$

Распределение частиц, осажденных на остальных коллекторных пластинах импактора:

$$z_2(x) = \varepsilon_2(x) \cdot [f(x) - z_1(x)], \quad (4)$$

$$z_3(x) = \varepsilon_3(x) \cdot [f(x) - (z_1(x) + z_2(x))], \quad (5)$$

$$z_4(x) = \varepsilon_4(x) \cdot [f(x) - (z_1(x) + z_2(x) + z_3(x))], \quad (6)$$

$$z_5(x) = \varepsilon_5(x) \cdot [f(x) - (z_1(x) + z_2(x) + z_3(x) + z_4(x))], \quad (7)$$

$$z_6(x) = \varepsilon_6(x) \cdot [f(x) - (z_1(x) + z_2(x) + z_3(x) + z_4(x) + z_5(x))]. \quad (8)$$

Таким образом, формула для распределения массы частиц, осажденных на коллекторной пластине любого каскадного элемента импактора, имеет вид:

$$z_i(x) = \varepsilon_i(x) \cdot \left(f(x) - \sum_{k=1}^{i-1} z_k(x) \right), \quad i > 1, \quad (9)$$

$$z_1(x) = \varepsilon_1(x) \cdot f(x), \quad i = 1,$$

где i – номер каскадного элемента, $f(x)$ – плотность распределения ЛНР с данным ММАД и стандартным геометрическим отклонением σ (СГО).

Допустимое время работы i -го каскада импактора вычисляется по формуле:

$$t_i = \frac{m_{max}}{M \cdot p_i}, \quad (10)$$

где m_{max} – допустимая масса осадка из аэрозольных частиц, осевших на коллекторной пластине под разгонным соплом (превышение данной величины приводит к изменениям характеристик каскада), г; p_i – доля массы аэрозольных частиц, осаждаемая на i -м каскаде; M – поток массы аэрозольных частиц, направленный на данный каскад, г/с:

$$M = \frac{C_m}{N} \cdot Q, \quad (11)$$

где C_m – массовая концентрация аэрозоля, г/м³; N – число сопел на данном каскаде; Q – объемный расход, м³/с.

$$p_i = \frac{\int_0^{50} z_i dx}{\int_0^{50} f(x) dx}, \quad (12)$$

где $f(x)$ – плотность распределения ЛНР с данным ММАД и СГО; z_i – распределение массы частиц, осажденных на i -м каскаде импактора.

Поверхностный медианный аэродинамический диаметр (ПМАД) и массовый медианный аэродинамический диаметр вычисляются по формулам [4]:

Табл.1. Значения D_{50} каскадов и соответствующие эмпирические коэффициенты a_i , b_i условного импактора (для объемного расхода 20 л/мин).

№ каскада	D_{50} , мкм	a_i	b_i
1	9	-15,09	1,66
2	5,8	-12,42	2,09
3	4,7	-11,43	2,42
4	3,3	-10,16	3,17
5	1,1	-9,13	8,69
6	0,43	-5,95	13,85

$$\text{ПМАД} = \text{СМАД} \cdot \exp(2 \cdot \ln^2 \sigma), \quad (13)$$

$$\text{ММАД} = \text{СМАД} \cdot \exp(3 \cdot \ln^2 \sigma), \quad (14)$$

где СМАД – счетный медианный аэродинамический диаметр, σ – СГО.

Для профессионального облучения рекомендуемое МКРЗ значение АМАД принято равным 5 мкм, что, как считается, является более представительным для аэрозолей на рабочих местах [5]. Если принять, что активность радионуклидов равномерно распределена по поверхности частиц (в этом случае АМАД будет равен поверхностному медианному аэродинамическому диаметру, ПМАД), то значение ММАД, вычисляемое из соотношений (13)-(14), в этом случае составит 12 мкм (при СГО = 2,5). Рассчитанные значения параметра p_i при данном значении ММАД и СГО представлены в табл.2.

Предельная высота осадка из аэрозольных частиц на коллекторной пластине определяется из следующих условий.

Из теории известно [2], что отношение расстояния от нижнего края сопельного отверстия до коллекторной пластины S к диаметру сопельного отверстия W (рис.2) для круглого сопельного отверстия должно быть больше единицы, т. к. невыполнение этого условия приводит к изменению величины $\sqrt{Stk_{50}}$ (рис.3).

Изменение значения числа Стокса в свою очередь ведет к изменению значения D_{50} каскада, который вычисляется по формуле:

$$D_{50} = \sqrt{Stk_{50}} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{C_c \cdot \rho_p \cdot V}}, \quad (15)$$

Табл.2. Значения p_i для импактора с D_{50} из табл.1 и для аэрозоля с ММАД = 12 мкм и СГО = 2,5.

Каскад	1	2	3	4	5	6	F
p_i	0,6	0,17	0,075	0,08	0,075	1,5e-3	4,4e-4

Табл.3. Значения D_{50} каскадов импактора, рассчитанные при различных значениях S/W .

S/W	Эффективный аэродинамический диаметр D_{50} , мкм						Отличие от номинального значения, %
	Номер каскада						
	1	2	3	4	5	6	
0,1	5,75	3,71	2,96	2,08	0,67	0,27	37
0,2	7,14	4,6	3,67	2,58	0,83	0,33	23
0,4	8,26	5,32	4,24	2,98	0,96	0,39	9
0,8	9	5,8	4,63	3,25	1,05	0,42	2
1	9,09	5,86	4,67	3,29	1,06	0,43	0

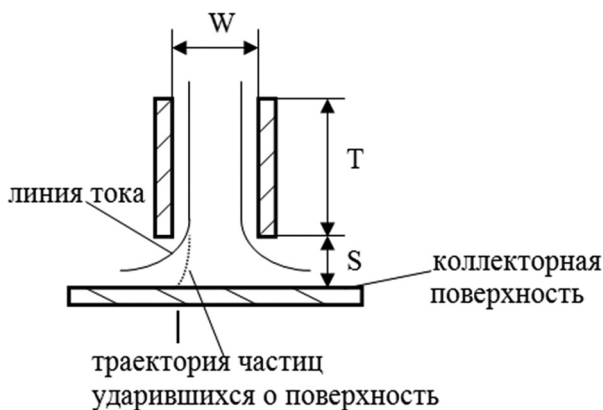


Рис.2. Схема каскада импактора.

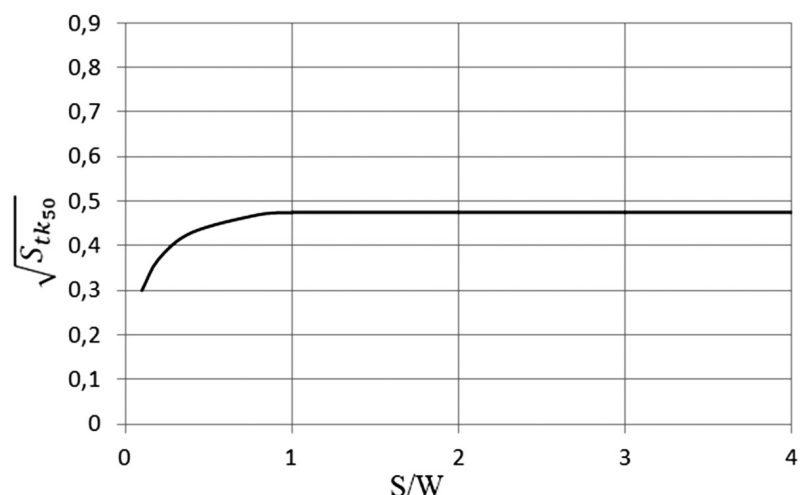


Рис.3. Зависимость квадратного корня из числа Стокса от зазора между срезами сопла и подложкой S/W [5].

где D_{50} – эффективный аэродинамический диаметр отсечки, м; μ – динамическая вязкость воздуха, кг/м с; Stk_{50} – число Стокса, соответствующее аэродинамическому диаметру частицы с эффективностью осаждения 50%; W – диаметр сопла, м; ρ_p – плотность частиц аэрозоля, кг/м³; V – линейная скорость движения частиц в сопле, м/с; C_c – поправка Каннингема ≥ 1 , учитывающая увеличение подвижности частиц, размер которых сравним со средней длиной пробега молекул газа.

В табл.3 представлены значения D_{50} каскадов импактора, рассчитанные при различных значениях S/W . Из таблицы видно, что значение $S/W = 0,2$ приводит к отклонению значения D_{50} от номинального значения на 23%. Отсюда вытекает условие для максимальной высоты осадка из осажденных аэрозольных частиц:

$$H_{max} = S - 0,2 \cdot W. \quad (16)$$

Рассчитанные значения H_{max} для различных каскадов импактора с характеристиками каскадов из табл.1 представлены в табл.4.

Моделирование и программные средства

Для расчета объема осадка из частиц, осажденных на подложке импактора, использовался CFD-пакет Star-CCM+. В программу загружалась трехмерная модель одного из каскадов. Для описания движения частиц дисперсной фазы применялась Лагранжева модель.

Через каскады моделировалось пропускание полидисперсных аэрозолей с ММАД 12 мкм и СГО = 2,5. На рис.4 представлен профиль массового потока (кг/м²·с) частиц, ударяющихся о подложку под одним из сопел первого каскада, полученный в результате моделирования. Форма осадка была восстановлена послойно в программном комплексе SolidWorks на основе данного профиля. Принималось, что максимальное значение массового потока на рис.4 соответствует H_{max} из табл.4 (2,33 мм), исходя из чего были рассчитаны высоты других слоев над уровнем подложки. Полученная форма осадка объемом 11 мм³ представлена на рис.5.

Рассчитаем значение предельной массы осадка под одним из сопел m_{max} при плотности частиц пыли 2,5 г/см³:

$$m_{max} = \rho_p \cdot V = 2,5 \text{ г/см}^3 (11 \cdot 0,001) \text{ см}^3 = 0,028 \text{ г.}$$

Табл.4. Рассчитанные значения максимальной высоты осадка, образованного из осажденных аэрозольных частиц, H_{max} для различных каскадов.

№ каскада	1	2	3	4	5	6
H_{max}	2,33	2,5	2,57	2,66	2,84	2,89

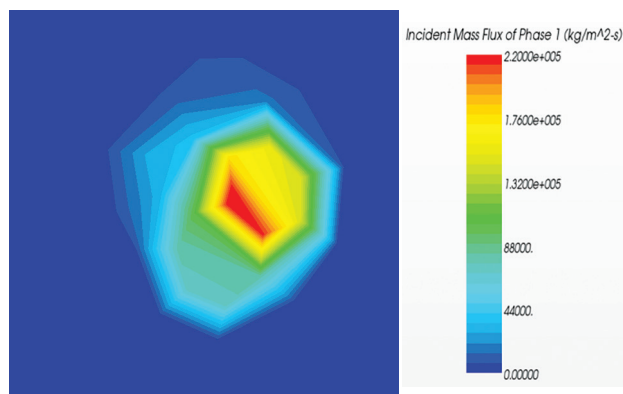


Рис.4. Профиль массового потока частиц, ударяющих о подложку под одним из сопел каскада 1.

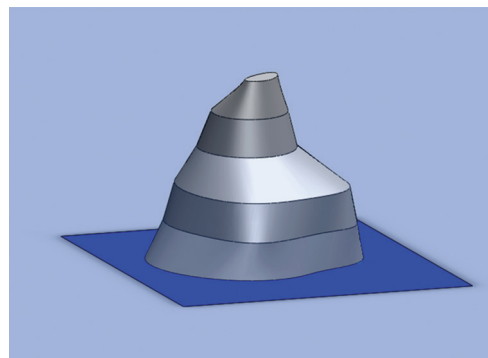


Рис.5. Форма осадка, восстановленная по профилю массового потока частиц (рис.4).

По формуле (11) рассчитаем значение потока массы M при массовой концентрации $C_m = 10 \text{ мг/м}^3$, объемном расходе $Q = 20 \text{ л/мин}$ и числе сопел $N = 24$.

$$M = [(10 \text{ мг/м}^3) / 24] \cdot [(20 \cdot (0,001 / 60)) \text{ м}^3] / c = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ г/с.}$$

При ММАД = 12 мкм и СГО = 2,5 значение параметра p для первого каскада составит 0,6 (табл.2).

Тогда допустимое время эксплуатации каскада импактора (10):

$$t = 0,028 \text{ г} / [(1,4 \cdot 10^{-7} \text{ г/с}) \cdot 0,6] = 3,3 \cdot 10^5 = 3,8 \text{ сут.}$$

Заключение

Проведена оценка пылеемкости каскада импактора с применением методов вычислительной гидродинамики. Получена формула для расчета допустимого времени работы каскада, при котором импактор осуществляет отбор пробы без изменения заданных характеристик. Приведен пример расчета пылеемкости для каскада с D_{50} , равного 9 мкм при объемном расходе 20 л/мин и предположении, что распределение частиц отбираемого аэрозоля характеризуется значением ММАД 12 мкм и СГО 2,5 (что соответствует значению АМАД 5 мкм при предположении равномерного распределения активности радионуклидов по поверхности частиц) при концентрации пыли 10 мг/м³ и плотности частиц 2500 кг/м³.

Расчет объема осадка из аэрозольных частиц, осажденных на подложке каскада импактора, выполнен с помощью программных комплексов Star-CCM+ и SolidWorks. Полученное допустимое время эксплуатации первого каскада импактора при указанных условиях составило 3,8 сут. Предложенная модель требует проведения экспериментальной проверки в лабораторных и производственных условиях.

Литература

1. S.M.Kerr, J.H.Vincent, G.Ramachandran. «A new approach to sampling for particle size and chemical species “fingerprinting” of workplace aerosols», *Ann Occup Hyg.*, Oct., 45(7), pp. 555-568, 2001.
2. D.J. Rader, V.A. Marple, «Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics», *Aerosol Science and Technology*, vol. 4, Issue 2, pp. 141-156, 1985.
3. Хазанов И.С. Эксплуатация и ремонт вентиляционных установок машиностроительных заводов. М.: Машиностроение, 1968. 342 с.
4. Будыка А.К., Борисов Н.Б. Волокнистые фильтры для контроля загрязнения воздушной среды. М.: ИздАТ, 2008. 359 с.
5. Кутьков В.А., Кухта Б.А. Радиологические свойства радиоактивных аэрозолей // АНРИ. 2006. № 4(47). С. 2-22.
6. Цовьянов А.Г., Крамер-Агеев Е.А., Фертман Д.Е., Ризин А.И., Карев А.Е., Мартынюк Ю.Н. Моделирование и разработка импактора-фантома респираторного тракта человека // АНРИ. 2013. № 3(74). С. 52-60.

Estimation of Dust Capacity of Impactor Stage

Tsovyanov Aleksandr, Karev Andrey (State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency – SRC-FMBC, Moscow, Russia)

Abstract. One aspect of changing characteristics of impactor stages during long sampling in conditions of high dust levels is considered in this article meaning changing of D_{50} stage values due to accumulation of sediment of non-radioactive dust on the stages and changing “nozzle-collector” distance (that can result to errors in AMAD calculation). Maximum height of sediment of aerosol particles on stage is calculated at which deviation from nominal value of D_{50} will not exceed 23%. Estimation of shape and volume of the sediment is done using CFD simulation. Allowable time of sampling is calculated for aerosol with given characteristics.

Article does not contain consideration of dustiness influence on the pressure drop of an impactor during long sampling and measurement uncertainties of total activity of alpha-emitting radionuclides due to different self-absorption of alpha-particles on stages.

Key words: *impactor, dust capacity, aerosol, particle size, sampling.*

А.Г.Цовьянов (зав.лаб.), А.Е.Карев (инж.) – ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г.Москва.

Контакты: тел.: +7 (903) 777-30-93; e-mail: atsovyan@mail.ru.