

УДК 54-138, 632.934.1, 541.182.2/3

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВОГО ИМПАКТОРА

¹Крючков А.В., ¹Смирнов М.Б., ²Поярков А.Ю.

¹Филиал ФГБУ «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, Киров, e-mail: kryuchkov.57@bk.ru;

²Управление начальника войск РХБЗ Вооруженных Сил Российской Федерации, Москва, e-mail: garyu1971@yandex.ru

Статья посвящена вопросам расчета параметров дискового импактора, предназначенного для определения дисперсного состава аэрозолей. Выведено соотношение для расчета эффективности осаждения частиц на подложках дискового импактора в зависимости от расхода воздуха, размеров каскадов импактора, размера (диаметра) и плотности частиц аэрозоля. Решено уравнение движения частицы в потоке воздуха, проходящего через щелевое отверстие в каскаде дискового импактора. Выводе уравнений предполагалось, что частицы имеют сферическую форму и любое их касание к подложке приводит к осаждению. Получено следующее выражение для минимального диаметра d_+ частиц, которые все осадят на подложку каскада: $d_+ \sqrt{C_c} = 3\sqrt{2} \mu S / (\rho_1 v)$, и соотношение для максимального диаметра частиц d_- , которые пройдут каскад без оседания: $d_- \sqrt{C_c} = 3\sqrt{\mu S / (2\rho_1 v)}$, где C_c – поправка Каннингема, μ – динамическая вязкость, S – расстояние от среза сопла до подложки, ρ_1 – плотность частицы, v – скорость воздуха. Полученные соотношения использованы при расчете и конструировании дискового импактора.

Ключевые слова: импактор, эффективность осаждения, время релаксации, подложка

CALCULATION OF PARAMETERS OF DISK IMPACTOR

¹Kryuchkov A.V., ¹Smirnov M.B., ²Poyarkov A.Y.

¹Affiliation of the Federal state establishment «48 Central Research and Development Institute» Russian Federation Ministry of Defense, Kirov, e-mail: kryuchkov.57@bk.ru;

²The office of the chief forces of radiation, chemical and biological protection of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, e-mail: garyu1971@yandex.ru

The article is devoted to the calculation parameters of the disk impactor intended for determining the particle size distribution of aerosols. Displayed value to calculate the efficiency of deposition of particles on the substrate disk impactor depending on air flow rate, the dimensions of the stages of the impactor, size (diameter) and density of aerosol particles. Solved the equation of motion of a particle in the stream of air passing through the slotted hole in the cascade disk impactor. In the derivation of the equations, it was assumed that the particles have a spherical shape and any touch to the substrate leads to the deposition. Obtained the following expression for the minimum diameter d_+ particles, all of which will settle on the substrate stage: $d_+ \sqrt{C_c} = 3\sqrt{2} \mu S / (\rho_1 v)$, and the ratio of the maximum particle diameter d_- , which will be held the helmet without subsidence: $d_- \sqrt{C_c} = 3\sqrt{\mu S / (2\rho_1 v)}$, where C_c is Cunningham amendment, μ – the dynamic viscosity, S – the distance from the nozzle to the substrate, ρ_1 – the density of the particle, v – the velocity of the air. The obtained ratios are used in the calculation and design of disk impactor.

Keywords: impactor, the deposition efficiency, the relaxation time, the substrate

Для фракционного осаждения частиц аэрозоля с целью определения их размеров и концентрации в дисперсионной среде используют импакторы (от *impactum* (лат.) – толкать, вталкивать). Существуют разнообразные конструкции этих устройств [2, 4]. Так, например, одним из наиболее распространенных является каскадный импактор Мэя. Работа импакторов основана на использовании эффекта инерционного движения частиц при резком изменении направления потока дисперсионной среды (воздуха). При изменении направления воздушного потока содержащиеся в нем частицы стремятся продолжить движение в прежнем направлении и сталкиваются с поверхностью, размещенной, как правило, перпендикулярно исходному направлению потока аэрозоля.

Воздух, несущий частицы аэрозоля, поступает в импактор с постоянной скоростью. Входное сопло первого каскада имеет самую широкую щель и на выходе из него

скорость потока самая низкая. Апертура щелей от каскада к каскаду последовательно снижается, а скорость потока аэрозоля ступенчато возрастает до максимального значения на выходе из щели сопла последнего каскада. В щелевом импакторе частицы аэрозоля, достигшие препятствий – пластин, с нанесенным на них адгезионным слоем и установленных в каскадах импактора вплотную к апертуре щелей, – фиксируются на них. Количественным анализом определяют массу или количество осевших на пластинах частиц. По соотношению масс или числа частиц, осевших на разных каскадах импактора, определяют дисперсный состав аэрозоля, а с учетом времени отбора проб аэрозоля и расхода воздуха через импактор – пофракционную концентрацию аэрозольных частиц в воздухе.

Разработаны теоретические основы расчета импакторов, и проведены экспериментальные исследования по осаждению

частиц аэрозоля на подложки (например, [1, 3, 5, 6]).

Целью настоящего исследования являлось:
– определение зависимости эффективности осаждения аэрозольных частиц на подложку каскада дискового импактора от апертюры щели, расхода воздуха, размеров частиц и их плотности, расстояния от щели до центра импактора;

– разработка методики расчета дискового импактора на основе полученных зависимостей эффективности осаждения частиц.

В исследовании использованы метод математического моделирования – описание движения аэрозольных частиц под воздействием воздушного потока диффе-

ренциальными уравнениями, и отчасти экспериментальный метод – проведен ряд испытаний разработанного на основе полученных теоретических соотношений дискового импактора на монодисперсных аэрозолях.

Оценим эффективность каскадов дискового импактора, в котором частицы аэрозоля проходят последовательно через каскады, представляющие собой концентрические щели. При этом расстояние от щели до центра импактора (радиус кривизны щели каскада) от каскада к каскаду уменьшается, а скорость воздуха возрастает.

На рис. 1 представлено сечение одного из каскадов дискового импактора.

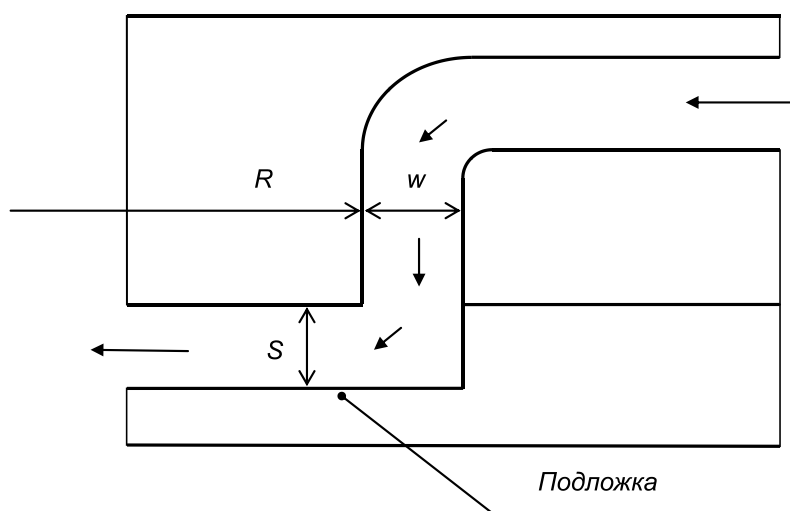


Рис. 1. Схема каскада дискового импактора

Скорость воздуха на входе в каскад равна

$$v = \frac{Q}{2\pi R w}, \quad (1)$$

где Q – объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; R – расстояние от щели каскада до центра импактора (радиус закругления щелевого отверстия каскада), м; w – ширина щели каскада (апертюры сопла), м. Предполагается, что $R \gg w$.

Максимальная эффективность импактора ε является отношением расстояния δ , на которое смещаются с линии тока в направлении подложки частицы, прошедшие каскад, к ширине апертюры сопла w :

$$\varepsilon = \delta / w. \quad (2)$$

Частицы с диаметром d будут смещаться с линии тока до тех пор, пока не потеряют свою первоначальную скорость в том направлении, которое они имели на входе в щель, т.е. нормально к поверхности осаж-

дения. В общем случае это расстояние δ не больше расстояния S от среза щелевого отверстия каскада до подложки и равно расстоянию торможения частиц [3]:

$$\delta = \tau v, \quad (3)$$

где τ – время релаксации, которое можно рассчитать по формуле [3]:

$$\tau = \rho_1 d^2 C_c / (18 \mu). \quad (4)$$

В этой формуле: ρ_1 – плотность частиц, d – их диаметр, C_c – поправка Каннингема, μ – динамическая вязкость воздуха.

Максимальная эффективность каскада импактора с учетом соотношения (3) определяется из выражения

$$\varepsilon = \tau v / w \quad (5)$$

или для импактора с конструктивным соотношением размеров $S = w$:

$$\varepsilon = \tau v / S. \quad (6)$$

Приведем пример, позволяющий оценить порядок значений характеристик импактора в отношении частиц аэрозоля с плотностью, близкой к плотности воды.

Пример. Входное щелевое отверстие импактора имеет радиус закругления $R = 5 \cdot 10^{-2}$ м и ширину щели $w = 1 \cdot 10^{-3}$ м. Определить расход воздуха через импактор, который необходим для полного осаждения

частиц диаметром $10 \cdot 10^{-6}$ м (10 мкм) и плотностью $\rho_1 = 1000$ кг/м³ (1 г/см³). Динамическая вязкость воздуха при 20 °С и нормальном давлении равна $\mu = 1,83 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Решение. Время релаксации частиц $\tau = \rho_1 d^2 C_c / (18 \mu) = 3,09 \cdot 10^{-4}$ с. Так как максимальная эффективность каскада импактора $\varepsilon = \tau v / w$, то скорость и расход воздуха должны быть равными соответственно:

$$v = \varepsilon w / \tau = 1,0 \cdot 1 \cdot 10^{-3} / (3,09 \cdot 10^{-4}) = 3,24 \text{ м/с}$$

$$\text{и } Q = 2\pi R \cdot w \cdot v = (6,28 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 3,24 = 1,0210^{-3} \text{ м}^3/\text{с} \text{ (61,2 л/мин)}.$$

Все частицы со временем релаксации, большим, чем

$$\tau_+ = S / v, \quad (7)$$

достигнут подложки и осядут на ней.

Учитывая формулу (4), связывающую время релаксации с диаметром частицы, из соотношения (7) можно найти минимальный диаметр d_+ частиц, которые все осядут на подложку каскада:

$$d_+ \sqrt{C_c} = 3 \sqrt{2 \mu \cdot S / (\rho_1 v)}. \quad (8)$$

Анализ поля скоростей в щелевом импакторе показывает, что существует значение числа Стокса, равное 1/4, ниже которого импакции частиц не происходит [3]. Правая часть в формуле (6) равна числу Стокса, так что получаем, что частицы с диаметром меньшим, чем

$$d_- \sqrt{C_c} = 3 \sqrt{\mu \cdot S / (2 \rho_1 v)}, \quad (9)$$

пройдут каскад, не оседая на его подложку.

Эффективность осаждения частиц с диаметрами ниже d_+ будет уменьшаться в соответствии со следующим соотношением

$$\varepsilon = \rho_1 d^2 C_c v / (18 \mu S). \quad (10)$$

Следует, однако, отметить, что расчет по формуле (10) может дать хорошее совпадение с экспериментальными данными лишь для частиц с диаметром больше некоторого d_* , которое больше в свою очередь d_- .

На основе полученных соотношений разработана методика расчета конструктивных параметров дискового импактора. Укрупненная схема алгоритма расчета параметров импактора для одного из вариантов методики представлена на рис. 2.

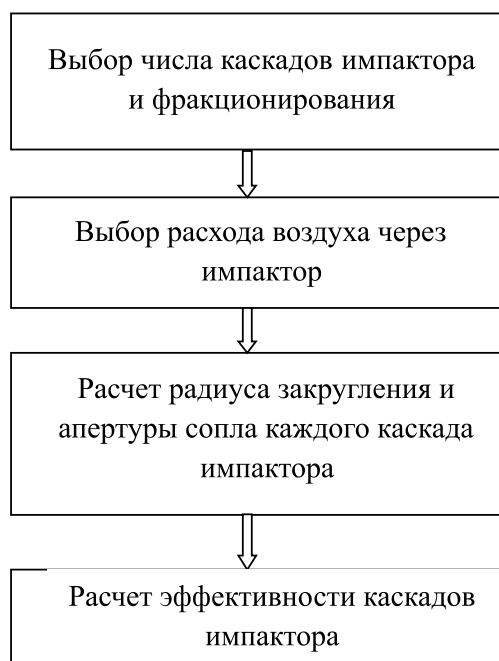


Рис. 2. Схема расчета конструктивных параметров дискового импактора

Следует отметить, что другой вариант методики предусматривает выбор максимального размера импактора (незначительно большего диаметра первого каскада) на начальных этапах расчета импактора с последующим расчетом необходимого расхода воздуха через него.

Используя разработанную методику, был произведен расчет геометрических параметров четырехкаскадного дискового импактора, предназначенного для фракционирования полидисперсного аэрозоля со сферическими частицами плотностью 1000 кг/м^3 (1 г/см^3) в диапазонах: свыше 10 мкм, от 5 до 10 мкм, от 2 до 5 мкм, менее 2 мкм. Расход воздуха через импактор был принят равным 20 л/мин. Изготовленный с найденными согласно методике геометрическими параметрами импактор был подвергнут испытаниям – проведены отборы проб монодисперсных аэрозолей с диаметрами частиц 14 мкм, 8 мкм, 4 мкм и 1,5 мкм и сравнение экспериментально найденных эффективностей каскадов дискового импактора с теоретически рассчитанными. Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что отличие экспериментальных данных от расчетных не превышает 10%. Это подтверждает применимость разработанной методики для расчета параметров дискового импактора.

Таким образом, в результате исследования получены соотношения, позволяющие по параметрам каскадов дискового импактора (радиусу закругления, ширине щели и расстоянию до подложки), диаметру и плотности частиц, расходу воздуха рассчитать эффективность каскадов импактора. Соотношения позволяют рассчитать конструктивные параметры каскадов, обеспечивающие максимальную эффективность осаждения на подложку частиц аэрозоля заданного размера и плотности. На основе теоретических соотношений разработаны варианты методики расчета дискового импактора, показавшие

удовлетворительную согласованность расчетных эффективностей каскадов импактора с экспериментально найденными.

Список литературы

1. Будыка А.К., Хмелевский Е.О., Припачкин Д.А., Цовьянов А.Г. Моделирование и экспериментальное исследование осаждения аэрозольных частиц в персональном импакторе // АНРИ. – 2009. – № 3. – С. 27–37.
2. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы, туманы. – Л.: Химия, 1969. – 427 с.
3. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
4. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. – М.: Атомиздат, 1964. – 360 с.
5. Фуks Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1955. – 351 с.
6. Фуks Н.А. Успехи механики аэрозолей. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. – 158 с.

References

1. Budyka A.K., Hmelevskij E.O., Pripachkin D.A., Cov'janov A.G. Modelirovanie i jeksperimental'noe issledovanie osazhdenija ajerozol'nyh chastic v personal'nom impaktore. – ANRI, 2009, no. 3, pp. 27–37.
2. Grin H., Lejn V. Ajerozoli – pyli, dymy, tumany. Leningrad: Himija, 1969. 427 p.
3. Rajst P. Ajerozoli. Vvedenie v teoriju: Per. s angl. M.: Mir, 1987. 280 p.
4. Spurnyj K., Jeh Ch., Sedlachek B., Shtorh O. Ajerozoli. M.: Atomizdat, 1964. 360 p.
5. Fuks N.A. Mehanika ajerozolej. Moskva. Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1955. 351 p.
6. Fuks N.A. Uspehi mehaniki ajerozolej. Moskva. Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1961. 158 p.

Рецензенты:

Флегентов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности, Вятский государственный университет, г. Киров;

Кучеренко А.С., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник филиала ФГБУ «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, г. Киров.

Работа поступила в редакцию 05.12.2014.