

УДК 539.612

А. Скапцов

Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДГЕЗИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В СИСТЕМЕ ВОЛОКОН

A. Skaptsov

ADHESION EFFICIENCY OF NANOPARTICLES IN THE FIBERS SYSTEM

В большинстве отраслей пищевой промышленности большое внимание уделяется чистоте воздуха в рабочих помещениях. Для создания безопасных условий труда и поддержания воздуха в состоянии, удовлетворяющем нормативным документам, регламентирующим переработку и производство продуктов питания, предприятиями используются сложные системы очистки воздуха. На этапе тонкой очистки газов часто применяют волокнистые фильтры, представляющие собой многослойную систему волокон размером от долей микрона до нескольких микрон, ориентированных либо упорядоченно («веерная» или «шахматная» системы), либо произвольным образом. Волокнистые фильтры хорошо зарекомендовали себя при улавливании аэрозольных частиц, размер которых не ниже 0,03 мкм. Частицы меньших размеров (наноразмерные частицы) способны проходить через систему волокон с большой долей вероятности. Одной из причин такого поведения частиц является эффект теплового отскока, характерный для наночастиц и наблюдающийся в случае, когда скорость теплового движения частиц превышает некоторую критическую скорость. Повысить улавливающую способность волокнистых фильтров можно путем применения материала волокон с высокой адгезионной способностью.

В настоящей работе рассмотрено движение наночастиц в устройствах, состоящих из системы волокон, ориентированных произвольным образом. Для описания поведения частиц использована классическая модель фильтрации, в которой одной из основных величин, определяемых теоретически и в процессе эксперимента, является коэффициент проскока, равный отношению концентрации аэрозольных частиц на выходе из устройства к концентрации на входе.

Классическая теория фильтрации предполагает, что для частиц размером несколько нанометров эффективность адгезии система частица-поверхность равна 1, т.е. при попадании на поверхность вероятность отскока частицы равна нулю. В классической теории рассматривают различные модели осаждения с целью определения коэффициента захвата частиц. Основными причинами захвата частиц волокнами являются инерция, прямой захват, действие электрических сил и диффузия частиц. Электрическими силами в теории фильтрации нанометрических частиц, как правило, пренебрегают ввиду того, что заряд частиц размером менее 30 нм не превышает одного элементарного заряда.

Для нанометрических частиц доминирующим механизмом, определяющим осаждение частиц на волокнах, является броуновская диффузия частиц. Именно благодаря хаотическому характеру движения частиц происходит контакт частиц с поверхностью волокон. В дальнейшем удержание частиц на поверхности происходит вследствие действия сил адгезии. Механизм адгезии частиц к поверхности является достаточно сложным и зависит от целого ряда факторов, определить роль каждого из которых представляется весьма трудной задачей. Поэтому часто говорят просто об адгезии частиц к поверхности, а в качестве характеристики применяется эффективность адгезии.

Одним из устройств, широко используемых на практике, и моделирующих систему волокон, ориентированных произвольным образом, является диффузионная батарея сеточного типа. Диффузионные батареи сеточного типа представляют собой набор параллельно расположенных сеток с одинаковыми геометрическими параметрами (размер волокна, размер ячейки, форма плетения волокон). Ранее было предложено рассматривать диффузионные батареи сетчатого типа как частный случай модельного «веерного» фильтра. Поэтому подход к описанию осаждения аэрозоля в батарее аналогичен подходу, применяемому к волокнистому фильтру. Устройства подобного рода находят широкое применение в практике аэрозольных исследований для определения функции распределения частиц по размерам и характеристик отдельных частиц. Осаждение аэрозоля в этом устройстве происходит таким же образом, как и в системе волокон. Проводя подобную аналогию и применяя теоретическое описание осаждения частиц в диффузионной батарее можно рассчитать коэффициент проскока через систему волокон.

Если предположить, что эффективность адгезии ε частиц к поверхности волокон не равна 1, то коэффициент проскока монодисперсного аэрозоля через батарею можно представить в виде:

$$P = \exp -z \varepsilon D^{2/3} ,$$

где z – некоторый параметр, зависящий от диаметра волокна сетки и плотности упаковки волокон, а также скорости течения аэрозоля через батарею; D – коэффициент диффузии частиц. Из представленной формулы следует, что эффективность адгезии может оказать существенное влияние на осаждение частиц в системе волокон. Подобно газовым молекулам нанометрические частицы участвуют в хаотическом движении и, сталкиваясь с волокнами фильтра, могут либо отскочить от поверхности, либо остаться на ней. Силы адгезии определяют прилипание частицы к поверхности волокон.

Далее, используя формулы для расчета геометрии течения и параметров диффузионной батареи, можно получить выражение для эффективности адгезии монодисперсных частиц к поверхности волокон:

$$\varepsilon = \chi r^{4/3} \ln P ,$$

где r – радиус частиц, χ – некоторый параметр, связанный с течением газа и размерами системы волокон. Анализ полученного выражения показывает, что эффективность адгезии зависит от размера частиц. С уменьшением размера эффективность улавливания частиц волокнами уменьшается, что находится в полном соответствии с результатами исследования эффекта теплового отскока нанометрических частиц, опубликованными в зарубежной литературе. Действительно, чем меньше размер частицы, тем больше ее скорость теплового движения. Если скорость частицы превышает критическую, то вероятность ее отскока от поверхности близка к единице.

Полученное выражение позволяет, рассчитать эффективность адгезии системы частица-поверхность, если измерить коэффициент проскока монодисперсного аэрозоля через диффузионную батарею. По нижнему и верхнему пределу реального спектра размеров частиц можно оценить диапазон изменения эффективности адгезии и степень повышения улавливания наночастиц из газовой среды. Для частиц органических соединений сложной формы, входящих в состав пищевых продуктов, такие оценки также возможны, но они носят весьма приблизительный характер.