М.А. Лупандина¹, О.Л. Пятакова²

(¹Кубанский государственный технологический университет, ²ЮФУ, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения; e-mail: timoshenkomaria@mail.ru)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ СИГАРЕТНОГО ДЫМА В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Проведены теоретическое и экспериментальное исследование осаждения нанои субмикронных аэрозольных частиц в гидродинамическом пограничном слое применительно к проблеме выбора параметров оборудования для интенсификации технологических процессов.

Ключевые слова: диффузионное осаждение, наночастицы, сигаретный дым, пограничный слой, промышленные аэрозоли.

M.A. Lupandina, O.L. Pyatakova EXPERIMENTAL RESEARCH THE DEPOSITION OF PARTICLES OF CIGARETTE SMOKE IN THE HYDRODYNAMIC BOUNDARY LAYER

Carried out the theoretical and experimental study of the deposition of nano and submicron aerosol particles in the hydrodynamic boundary layer is applied to the problem of choosing the parameters of the equipment for an intensification of technological processes.

Key words: diffusion deposition, nanoparticles, cigarette smoke, a boundary layer, industrial aerosols.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 17 ноября 2016 г.

Экспериментальная установка для исследования осаждения аэрозольных частиц в диффузионном потоке через гидродинамический пограничный слой обязательно должна включать в себя осадительную камеру, генератор аэрозоля, а также систему протяжки воздуха. Осадительная камера должна быть достаточной протяженности, чтобы иметь возможность производить отбор проб на различных расстояниях от источника аэрозоля.

Конструкцию генератора аэрозоля обуславливает тип выбранных частиц. Нанопорошки слишком дороги и труднодоступны, а также представляют серьезную угрозу жизни и здоровью при работе с ними (из-за высокой проницаемости в биологические структуры). Поэтому в качестве наноразмерного аэрозоля выбран сигаретный дым. Сигареты имеются в свободной продаже, а генерирование дыма очень просто: необходимо и достаточно имитировать процесс курения, то есть поджечь с одного конца и обеспечить протяжку дыма с другого. Следовательно, в данном исследовании генератор аэрозоля конструктивно будет представлять собой устройство, фиксирующее сигарету поджигаемым концом над осадительной камерой и противоположным концом внутри неё. Система протяжки воздуха входит в состав генератора дыма ("раскуривает" сигарету), обеспечивает создание гидродинамического пограничного слоя и является осевым вытяжным вентилятором. Горение различных сигарет одинаково, что при многократном повторении эксперимента обеспечивает достоверность получаемых результатов.

Следует отметить, что повторяемость результатов измерений размерных характеристик частиц выполняется при условии доверия к марке производителя сигарет.

Выбранный нами осевой вентилятор обеспечивает протяжку воздуха со скоростью 292 *л/мин*. или 17,52 $M^3/4$. Тогда скорость воздуха в трубе круглого сечения диаметром 50 *мм* составит примерно 0,8 *м/с*. Длина трубы 0,8 *м*, толщина гидродинамического пограничного слоя при этом будет равна $\delta = 0,02 \, m$. Таким образом, поток будет оставаться ламинарным по всей протяженности трубы.

Исследования наноаэрозолей стали возможны лишь в последние годы, благодаря появлению атомно-силовой микроскопии, и ранее не проводились, поскольку размеры частиц меньше длины волны красного света, поэтому они не видимы для оптического и электронного микроскопов.

После включения протяжки воздуха, в трубе создается гидродинамический поток, при этом около стенок имеет место градиент скорости потока, обуславливая наличие пограничного слоя. При установившемся режиме потока, через специальные отверстия вносятся ситалловые подложки, на которые осаждаются наночастицы сигарет. Подложки устанавливаются горизонтально вдоль оси *x*. Время экспозиции – одна секунда. Скорость протяжки воздуха в трубе – 0,8 *м/с*. Исследования проводились с четырьмя сортами сигарет, отличающимися производителем и ценовой категорией.

Осаждение частиц осуществляется на подложки из ситалла, предварительно очищенные, которые, впоследствии, просматриваются под наномикроскопом, размеры подложек составляют 0,5×0,5 *см*.

Исследуемые аэрозольные наночастицы обладают малой механической жесткостью (из-за смол, входящих в состав сигаретного дыма), поэтому следует применять бесконтактные колебательные методики атомно-силовой микроскопии, основанные на регистрации параметров взаимодействия колеблющегося кантилевера с поверхностью. В бесконтактном режиме исследуют образцы биологических объектов и органических структур, при этом исключаются повреждения зонда и поверхности исследуемого объекта в процессе сканирования.

Одним из основных параметров аэрозолей, который можно прямо определить при помощи измерений, является дисперсный состав, который характеризует распределение частиц по размерам и медианный диаметр. Медианный диаметр – это размер гипотетической частицы, являющейся представителем всех частиц в пробе. Дисперсное распределение исследуемых аэрозолей подчиняется нормально-логарифмическому закону, поэтому по вертикальной оси откладываем процентное содержание частиц, а по горизонтальной оси – log *R*. При этом, в такой вероятностно-логарифмической сетке распределение аэрозольных частиц по размерам имеет форму прямых линий. Подобное явление наблюдается у многих видов аэрозолей (промышленных дымов, природных туманов, смогов), что говорит о правильности выбранной теории [4].

Подсчитав на полученных при помощи атомно-силовой микроскопии сканах осевшие частицы и измерив их размеры, построим дисперсное распределение.

На рис. 1 представлено дисперсное распределение образца № 1. По оси у отложено процентное содержание частиц, а по оси x – размеры частиц в *мкм*. Медианный размер частиц составляет 0,55 *мкм*. Из графика видно, что аэрозоль имеет широкий разброс по размерам.



Рис. 1. Дисперсное распределение частиц сигаретного дыма, осаждённых в гидродинамическом потоке. Образец № 1

На рис. 2 представлено дисперсное распределение образца № 2. Медианный размер частиц составляет 0,25 *мкм*. Данный вид сигарет относится к более высокому ценовому сегменту, отсюда можно предположить, что качество табака связано с размером частиц дыма. Из графика видно, что данный аэрозоль также имеет широкий разброс по размерам.



Рис. 2. Дисперсное распределение частиц сигаретного дыма, осаждённых в гидродинамическом потоке. Образец № 2

На рис. 3 представлено дисперсное распределение образца № 3. Медианный размер частиц образца 0,34 *мкм*. График показывает, что данный аэрозоль близок к монодисперсному, разброс по размерам составляет лишь десятые доли микрон.



Рис. 3. Дисперсное распределение частиц сигаретного дыма, осаждённых в гидродинамическом потоке. Образец №3

На рис. 4 представлено дисперсное распределение образца № 4. Медианный размер частиц составляет 0,34 *мкм*. Данный вид сигарет также относится к более высокому ценовому сегменту. График показывает, что данный аэрозоль также имеет широкий разброс по размерам.



Рис. 4. Дисперсное распределение частиц сигаретного дыма, осаждённых в гидродинамическом потоке. Образец №4

В данном исследовании мы имеем возможность напрямую определить поток аэрозоля, посчитав число частиц, осевших на подложку за единицу времени, и сравнить полученные результаты с разработанной математической моделью.

На рис. 5 представлен график экспериментально полученных значений потока аэрозольных частиц сигаретного дыма, осаждённых в гидродинамическом потоке при параметрах, указанных выше.





Полученные экспериментальные зависимости хорошо коррелируют с теоретическими. Как видно из графиков, поток аэрозольных частиц на поверхность уменьшается с расстоянием от источника.

Следует отметить, что частицы сигаретного дыма имеют сферическую форму и являются наноразмерными, однако из-за смолистой структуры, при осаждении на подложку они расплываются и принимают форму, объективно наблюдаемую на сканах. Кроме того, исследование нано объектов с подобной хрупкой структурой важно при освоении бесконтактных методик атомносиловой микроскопии.

Исследование было выполнено по гранту Российского фонда фундаментальных исследований, НИР 2.10.138, научный проект № 16-32-50002 по теме исследования: "Осаждение и диффузия субмикронных и наночастиц промышленных аэрозолей через гидродинамический пограничный слой для интенсификации технологических процессов".

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред // М. Л., 1944. 244 с.

2. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: изд-во Академии Наук, 1955. 351 с.

3. Эберт Г. Справочник по физике. М.: изд-во физ.-мат.-лит., 1963. 522 с.

4. *Тимошенко В.И., Чернов Н.Н.* Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле. Ростов-на-Дону: ООО "Ростиздат", 2003. 304 с.