

тер влияния модификации поверхности НМХ сплавом на характеристики горения металлизированных и малометаллизированных ЭКС. В одном случае (для металлизированных рецептур) использование в составе ЭКС модифицированного НМХ снижает скорость горения и ее зависимость от температуры при одновременном повышении барического коэффициента (таблицы 2, 3), в другом (малометаллизированных рецептур) происходит снижение скорости горения и барического показателя v , но увеличивается температурный градиент (таблицы 4, 5).

Полученный результат согласуется с теорией горения Зельдовича о сближении зон и позволяет применять приемы модифицирования нитраминов для регулирования баллистических характеристик в конкретных прикладных системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. – М.: МО РФ, 1999. – 332с.
 2. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. – Л.: «Химия», 1973. – 688 с.
 3. Мишукова Е.В., Калмыков П.И., Панченко Н.Ф. // Перспективы создания и применения конденсированных энергетических материалов: сборник докладов I Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, 27-29 сентября 2006. г. Бийск: ИПХЭТ СО РАН. – 2006. – 197с.
 4. Печенев Ю.Г., Фурнэ В.В. // Актуальные проблемы разработки и использование ВВ и составов на их основе: сборник докладов II Российской научно-технической конференции, 26-28 октября 1999. г. Дзержинск: ФГУП «ГосНИИ» Кристалл». – 2003. –111-118с.
 5. Бахман Н.Н, Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М.: «Наука», 1967. – 227с.
1. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ со-

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, С.С. Титов, Е.В. Максименко

Предложен новый метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей и экспериментально-измерительный комплекс для его реализации. Разработан алгоритм решения обратной некорректной задачи с использованием параметризации.

ВВЕДЕНИЕ

Течения газа со взвешенными в нём жидкими субмикронными частицами широко распространены в природе, а также играют важную роль во многих отраслях современной техники. Физика многофазных потоков чрезвычайно сложна и многообразна; в определяющие уравнения входит, как правило, целый ряд эмпирических зависимостей и констант. Поэтому при исследовании таких потоков существенное значение имеют экспериментальные методы. Экспериментальная информация об основных параметрах конденсированных частиц – концентрации, дисперсности, скорости, температуре – не только позволяет оценивать степень адекватности реальному процессу принятой для его описания математической модели, но в большинстве случаев является необходимой в каче-

стве исходных данных для проведения расчётов рабочих процессов в конкретных устройствах. Наиболее перспективными методами получения экспериментальной информации являются бесконтактные методы измерений. Их основное преимущество перед зондовыми методами – отсутствие возмущений исследуемого течения [1].

Одними из бесконтактных методов измерений параметров многофазных потоков являются оптические методы, основанные на наблюдении за прошедшим через поток зондирующим излучением. По характеристикам преломлённого, ослабленного либо отражённого излучения можно оценивать изменение дисперсности жидкой фазы и её концентрации. Кроме этого важно знать объём облака аэрозоля и скорость его распространения. Для одновременного измерения этих параметров необходимо несколько измеритель-

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

ных инструментов, собранных в единый комплекс.

ВЫБОР МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Из существующих оптических методов измерения дисперсности гетерогенных потоков был выбран метод спектральной прозрачности. Решение о применении метода спектральной прозрачности принято с учётом результатов анализа существующих методов (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение метода спектральной прозрачности (МСП), метода малых углов (ММУ) и метода полной индикатрисы (МПИ) по диапазонам размеров измеряемых частиц

	МСП*	ММУ**	МПИ**
Диапазон размеров измеряемых частиц, м	$1.1 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7} - 10^{-4}$
* – по данным [2]			
** – данные приведены для длины волны 632,8 нм			

Проведённая расчётно-теоретическая оценка диапазона размеров измеряемых частиц с помощью выбранного метода показала что:

$$D_{\min} = 22 \text{ нм}$$

$$D_{\max} = 10500 \text{ нм.}$$

При оценке минимального и максимального диаметров субмикронных частиц, измеряемых МСП, использовались предположения, что если размеры частиц много меньше длины волны излучения ($D \leq 0.06\lambda$), то имеет место релеевское рассеяние, а если размер частиц много больше длины волны ($D > \frac{30\lambda}{\pi}$), то взаимодействие излучения с частицей определяется законами геометрической оптики [1].

МСП позволяет измерять дисперсность неустановившейся гетерогенной системы с высокими скоростями её движения при высокой фоновой освещённости, регистрировать частицы с диаметрами от десятков нанометров, использовать малое количество датчиков в зоне измерения с возможностью контроля реальных технологических процессов.

Для измерения геометрических и скоростных характеристик облака субмикронного аэрозоля совместно с методом спектральной прозрачности целесообразно использование высокоскоростной видеосъёмки, что расши-

ряет возможности метода и повышает информативность измерений.

Предлагаемый экспериментальный комплекс позволит проводить измерения как в процессе создания и эволюции аэрозоля, так и в установившейся среде.

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Технология реализации МСП связана, как правило, с использованием тепловых источников зондирующего излучения в сочетании со сканирующими спектральными приборами.

МСП основан на измерении спектрального коэффициента пропускания оптического излучения двухфазным потоком в некотором диапазоне длин волн. Исходным для МСП является уравнение (1)[1]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[-\frac{\pi C_n l}{4} \int_0^{\infty} Q \left(\frac{\pi D}{\lambda}, m \right) D^2 f(D) dD \right], \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность прошедшего через аэрозоль излучения; $I_0(\lambda)$ – интенсивность зондирующего излучения; C_n – счётная концентрация конденсированной фазы аэрозоля; l – длина оптического пути; Q – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения; D – диаметр частиц; λ – длина волны зондирующего излучения; m – комплексный показатель преломления конденсированной фазы аэрозоля, $f(D)$ – функция распределения частиц по размерам.

МСП, описанный в [2] и основанный на решении обратной задачи при восстановлении функции распределения оптически мягких частиц по размерам, применим в области, где зависимость фактора эффективности ослабления (Q) от длины волны (λ) наиболее сильно выражена (в области до первого максимума функции Q). Устойчивое решение возможно, если прозрачность определена на всём интервале длин волн. Тем не менее, если учитывать асимптотику поведения спектрального коэффициента пропускания, то требуемый интервал длин волн можно сузить. Но всё же обратная задача нахождения диаметров частиц аэрозоля по выражению (1) некорректна. Указанная некорректность является неизбежной для рассматриваемого метода. Предлагается решать эту задачу с помощью так называемых регуляризующих алгоритмов.

Регуляризующие алгоритмы строятся на основе привлечения дополнительной апри-

орной (по отношению к эксперименту, на основании которого ставится обратная задача) информации об искомой функции. С помощью такой информации (сведения о гладкости искомого решения, его монотонности, выпуклости, принадлежности к конечно-параметрическому семейству и т.п.) отбирается из множества возможных решений такое, которое в определённом смысле близко к истинному. Регуляризующие алгоритмы позволяют получить устойчивое приближение к истинному решению некорректной задачи, т.е. при стремлении погрешностей измерений к нулю приближённое решение стремится к истинному.

Наиболее простой способ регуляризации (метод параметризации) заключается в том, что считается априорно известным вид функции распределения ($f(D)$ в выражении (1)) [3]. Фактор эффективности ослабления (Q) рассчитывается в соответствии с точными формулами теории Ми рассеяния по заданным параметрам функции распределения. Численными методами решается прямая задача определения спектрального коэффициента ослабления зондирующего излучения для различных параметров функции распределения, и определяются параметры, соответствующие наилучшему совпадению расчётных и измеренных данных. Метод параметризации при реализации МСП ранее не применялся.

Предложенная модернизация МСП основывается на использовании спектрометра, позволяющего проводить измерения спектрального коэффициента пропускания на участке длин волн от 360 до 1100 нм.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Блок схема разработанного измерительного комплекса представлена на рисунке 1.

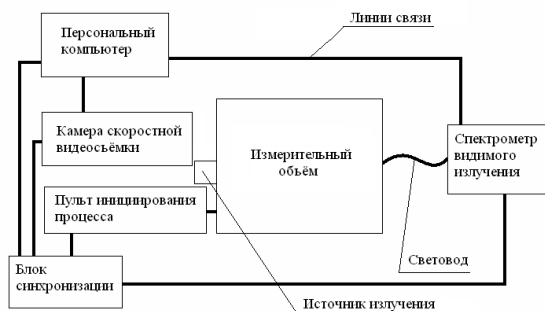


Рисунок 1. Блок схема измерительного комплекса

Схема расположения источника и приёмника зондирующего излучения внутри измерительной камеры и относительного поло-

жения скоростной видеокамеры приведена на рисунке 2.

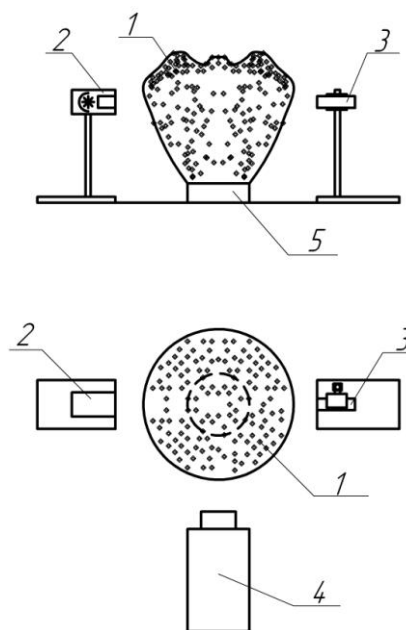


Рисунок 2. Схема расположения измерительных элементов: 1 – облако аэрозоля, 2 – источник видимого излучения, 3 – приёмник видимого излучения, 4 – камера скоростной видеосъёмки, 5 – устройство создания аэрозоля

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА

После нахождения экспериментального значения спектрального коэффициента пропускания ($\tau_\lambda = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}$), необходимо найти

функцию распределения частиц аэрозоля по размерам, соответствующую найденному коэффициенту. Для чего выполняются следующие действия.

1. Методом циклического покоординатного спуска задаются параметры a и b для того, чтобы найти априорный вид распределения частиц по размерам с использованием функции (2)

$$f(D) = aD^\alpha \exp(-bD), \quad (2)$$

где a находится из условия (3)

$$\int_0^\infty aD^\alpha \exp(-bD) dD = 1. \quad (3)$$

Функция (2) представляет собой обычное гамма-распределение. Гамма-распределение выбрано для общности описания: практически любое одномодальное распределение частиц по размерам можно

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

аппроксимировать обобщённым гамма-распределением.

2. Рассчитывается значение τ_λ для фиксированной λ по формуле (4):

$$\tau_\lambda = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m\right) D^2 f(D) dD, \quad (4)$$

где l – находится экспериментально с помощью скоростной видеосъёмки; счётная концентрация рассчитывается по формуле (5):

$$C_n = C_v \left[\frac{\pi}{6} \int_0^\infty D^3 f(D) dD \right]^{-1}, \quad (5)$$

где C_v – объёмная концентрация конденсированной фазы аэрозоля находится экспериментально с помощью скоростной видеосъёмки; фактор эффективности ослабления рассчитывается по формуле (6):

$$Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m\right) = \frac{2}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2} \sum_{n=1}^\infty (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (6)$$

где коэффициенты M_i (a_n и b_n) находятся по следующим формулам:

$$a_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m\right) = \frac{\left[\frac{A_n\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right)}{m} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[\frac{A_n\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right)}{m} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}$$

$$b_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m\right) = \frac{\left[m A_n\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[m A_n\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}$$

где

$$\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \frac{2n-1}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-2}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right),$$

$$\xi_0\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) + i \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right),$$

$$\xi_{-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - i \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right);$$

$$A_n\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right) = -\frac{n}{\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right)} + \left[\frac{n}{\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right)} - A_{n-1}\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right) \right]^{-1},$$

$$A_0\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right) = \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi D m}{\lambda}\right).$$

$Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m\right)$ считается найденной при выполнении условия (7) [4]:

$$\left[\sum_{n=1}^N (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \right] \cdot 10^{-8} > (2(N+1)+1) \operatorname{Re}(a_{N+1} + b_{N+1}). \quad (7)$$

3 Сравнивается τ_λ расчётное с τ_λ экспериментальным для заданной λ :

$$\tau_\lambda^{(\text{э})} - \Delta < \tau_\lambda^{(p)} < \tau_\lambda^{(\text{э})} + \Delta, \quad (8)$$

где $\tau_\lambda^{(\text{э})}$ – экспериментальное значение коэффициента спектрального пропускания; $\tau_\lambda^{(p)}$ – расчётное значение коэффициента спектрального пропускания; Δ – допустимое отклонение расчётного значения коэффициента спектрального пропускания от экспериментального. По выполнению или невыполнению условия (8) делается вывод о соответствии либо несоответствии расчётного распределения частиц по размерам ($f(D)$) экспериментальному для данной длины волны. После чего λ увеличивается на размер одного итерационного шага и повторяется пункт 2. Так происходит до тех пор, пока не достигнут верхний предел длин волн, после достижения которого все вычисления повторяются, начиная с пункта 1.

После прохождения параметрами α и b в функции гамма-распределения всех возможных значений, делается выбор наиболее подходящего распределения в соответствии с наилучшим выполнением для него условия (8) (наименьшее значение Δ) на всех длинах волн.

Возможна и другая реализация предложенного алгоритма расчёта. Отличие заключается в том, что аналитически находится не τ_λ , а отношение $\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2}$ (9), благодаря чему удаётся избавиться от расчёта и нахождения C_n и l , а, соответственно, и от ошибок, связанных с определением этих величин:

$$\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} = \frac{\int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_1}, m\right) D^2 f(D) dD}{\int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_2}, m\right) D^2 f(D) dD}. \quad (9)$$

И сравниваться тогда будут не $\tau_\lambda^{(p)}$ и $\tau_\lambda^{(\text{э})}$, а

$$\frac{\tau_{\lambda_1}^{(p)}}{\tau_{\lambda_2}^{(p)}} \text{ и } \frac{\tau_{\lambda_1}^{(\text{э})}}{\tau_{\lambda_2}^{(\text{э})}}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ методов измерения дисперсности гетерогенных потоков и уста-

новлено, что для осуществления измерения параметров субмикронных аэрозолей наиболее оптимально подходит метод спектральной прозрачности с предложенным алгоритмом решения обратной задачи в сочетании с применением скоростной видеосъемки. Предложен возможный вариант конфигурации аппаратуры. Показана математическая реализация прямого метода решения обратной задачи оптики аэрозолей, которая для метода спектральной прозрачности ранее не использовалась. Данная реализация позволяет МСП проводить измерения дисперсных параметров частиц с различными оптическими свойствами, в том числе определять дисперсность природных аэрозолей, аэрозолей, применяемых в технологических процессах и конденсированной фазы продуктов горения высокоэнергетических материалов.

Предложено создание аппаратной реализации, являющейся новой измерительной системой, с ещё не использовавшимся спо-

собом получения измерительной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. – Томск.: Издательство Томского университета, 1987. – 140 с.
2. Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. Под ред. Степанова Б.И., Иванова А.П. – Минск.: Наука и техника, 1971. – 487 с.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.
4. Пришивалко А.П., Науменко Е.К. Рассеяние света сферическими частицами и полидисперсными средами. – Минск, 1972. – 62 с.

КОМПАКТИРОВАНИЕ, СПЕКАНИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА

Р.П. Колмыков, А.В. Иванов

В работе изучены поведение наноструктурированных переходных металлов никеля и кобальта при компактировании и спекании. Исследованы электрофизические свойства компактных нанокристаллических металлов, проведена аналогия между чистотой поверхности и электрофизическими свойствами данных материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением развития техники на современном этапе является исследование и закономерности регулирования свойств нанокристаллических материалов. Особое место среди подобных материалов занимают компакты и полимерные композиции с дисперсным металлическим наполнителем, которые находят широкое применение в электронной промышленности при создании токопроводящих паст и клеев для холодной пайки деталей электронных приборов, светоизлучающих диодов в часах и микрокалькуляторах, экранирующих покрытий для защиты от электромагнитных излучений и др.

В основном, в электропроводящих композициях используют серебро, благодаря его высокой электропроводности и стойкости к окислению мелких частиц [1]. В последнее время все больше внимания уделяется соз-

данию композиций на основе благородных металлов, в частности переходных, обладающих более низкой себестоимостью, а также магнитными свойствами, что еще более привлекательно для электроники.

При наноструктурировании материалы получают новые свойства и характеристики, отличающиеся от свойств объемных материалов. В частности, происходит изменение электронной структуры и проводимости.

Изменение электропроводности – один из важных методов исследования материалов. Изменения электропроводности позволяют выяснить динамику носителей заряда, характер их взаимодействия друг с другом, с соответствующими дефектами и примесями в твердом теле.

Нанометровый размер частиц приводит к изменению электронных состояний [2]. Переход от массивного к наноматериалу происходит с разделением электронных зон на