

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

Э. И. АБАРБАНЕЛЬ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА
И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

(05.325— порошковая металлургия)

(на русском языке)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНСК 1972

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы ставится задача создания и освоения новых, наиболее экономичных материалов. Важное место в ускорении темпов научно-технического прогресса принадлежит порошковой металлургии, быстрое и широкое развитие которой позволило найти материалы, обладающие новыми свойствами, и изыскать такие возможности их применения, которые раньше казались неосуществимыми. Особое значение порошковая металлургия приобрела для ядерной техники и ракетостроения. Многие другие промышленные процессы связаны с обработкой, потреблением или производством порошков. Достаточно упомянуть абразивы, керамику, ферриты, цемент, стекло, красители, уголь, удобрения, бумагу, медикаменты, косметические товары и многие другие продукты промышленного производства.

Современная тенденция в области измельчения и применения порошковых материалов проявляется в непрерывном уменьшении размеров частиц. При этом многие порошки обнаруживают столь необычные свойства, что их дисперсное состояние вполне можно рассматривать как особое, при котором степень измельчения материала имеет не меньшее значение, чем химический состав или наличие примесей. Поэтому гранулометрический анализ — определение спектра частиц тонких полидисперсных материалов — стоит в ряду необходимых и сложных современных технических проблем. Непрерывное повышение качества порошковых материалов требует создания быстрых и эффективных способов определения их дисперсных характеристик, особенно в области субмикронных размеров.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию нового способа и устройства для гранулометрического анализа тонких полидисперсных материалов, частицы которых имеют микронные и субмикронные размеры. Работа состоит из пяти глав.

В главе I «Методы исследования гранулометрического состава дисперсных систем» рассмотрены основные работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям в области дисперсного анализа. Одной из основных характеристик, общей для всех тонкоизмельченных веществ, является распределение частиц по размерам. Единственным прямым способом измерения величины частиц и определения их формы является оптическая и электронная микроскопия, которой присущи такие существенные недостатки, как дискретность получения информации и ошибки, связанные с субъективным восприятием оператора, особенно при анализе частиц неправильной формы. Поэтому чаще всего для исследования дисперсности пользуются косвенными методами, в основе которых лежит зависимость между определенными физическими или химическими свойствами частиц дисперсной системы и их величиной.

В настоящее время известно свыше 80 различных методов измерения дисперсности, но только небольшое число из них может быть использовано для гранулометрического анализа тонких порошков, содержащих частицы микронных и субмикронных размеров. Особенно ограничен выбор методов, с помощью которых можно находить функции распределения частиц по размерам. Такие функции дают наиболее исчерпывающую характеристику дисперсных систем и их определение является основной задачей гранулометрического анализа.

В последнее время в связи с общей тенденцией уменьшения размеров частиц, применяемых в современной технологии дисперсных материалов, проявляется повышенный интерес к методам центробежной седиментации, позволяющим осуществить гранулометрические измерения в области микронных и субмикронных размеров, в которой методы гравитационной седиментации оказываются совершенно неэффективными из-за длительного времени анализа и возмущающего влияния конвекции и броуновского движения, существенно искажающих результаты.

Глава II «Теоретические основы центробежного седиментационного анализа» посвящена исследованию основных закономерностей движения частиц в вязкой жидкости, вращающейся в полом роторе относительно горизонтальной оси. С точки зрения точности анализа несомненное преимущество седиментации при вращении роторной кюветы в вертикальной плоскости состоит в том, что при этом исключается воздействие на частицы со стороны днища кюветы, которое искажает результаты анализа. Получены уравнения движения

частицы и показано, что начальная скорость, с которой частица вводится во вращающийся поток вязкой жидкости, существенно не изменяет характер ее дальнейшего движения. Этот вывод важен для обоснования седиментационного анализа способом стартового слоя. В общем случае движение частицы происходит под влиянием не только центробежного, но и гравитационного силовых полей. При достаточно больших скоростях вращения движение частицы зависит только от воздействия центробежного поля, так как влияние гравитационной силы быстро убывает.

В общем случае движение частицы во вращающейся вязкой жидкости в установившемся режиме описывается уравнением:

$$R = R_0 e, \quad (1)$$

где a — Стоксовский диаметр частицы;

ρ — пикнометрическая плотность материала частицы;

η — динамическая вязкость седиментационной жидкости;

R_0 — модуль радиус-вектора частицы в начальный момент времени;

R — модуль радиус-вектора частицы в момент времени t ;

ω — угловая скорость вращения седиментационной жидкости, равная скорости вращения роторной кюветы;

ω_r — угловая скорость вращения радиус-вектора частицы, равная:

$$\omega_r = \omega \sqrt{\frac{\frac{\rho_0}{\rho} - \frac{\nu^2}{\omega^2} + \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{\rho} - \frac{\nu^2}{\omega^2}\right)^2 + 4 \frac{\nu^2}{\omega^2}}}{2}}, \quad (2)$$

здесь ρ_0 — плотность седиментационной жидкости;

ν — седиментационный параметр частицы

$$\nu = \frac{9\eta}{a^2\rho}, \quad (3)$$

В случае малых частиц, для которых выполняется условие

$$a \ll \sqrt{\frac{9\eta}{\rho\omega}}, \quad (4)$$

уравнение движения упрощается и приводится к известной формуле Сведберга-Ринде:

$$\frac{a^2 (\rho - \rho_0) \omega^2}{18\eta} t \quad (5)$$

$$R = R_0 e .$$

Теоретический анализ закономерностей седиментации частиц позволяет предложить способ центробежной классификации порошков и исследования их гранулометрического состава, в основе которого лежит функциональная зависимость между размером частицы и углом поворота, на который она отклоняется относительно связанной с ротором системы отсчёта.

Полный угол, на который повернётся радиус-вектор частицы при её седиментации с уровня R_0 до уровня R , равен:

$$\varphi = \frac{a^2 \rho \omega r}{9\eta} \ln \frac{R}{R_0} . \quad (6)$$

Наибольшее практическое значение имеет та область седиментационного анализа, которая базируется на законе Стокса для вязкого сопротивления среды. В связи с этим в работе рассматривается ряд условий, выполнение которых необходимо для точного анализа.

Седиментационные исследования дисперсных систем как и гравитационном, так и в центробежном полях могут быть осуществлены по двум методикам. Способы, основанные на периодическом или непрерывном измерении концентрации частиц исследуемого материала, проходящих на заданном уровне, получили название инкрементальных или дифференциальных. Вторая группа способов анализа связана с измерениями общего количества вещества, осаждающегося на определенном уровне в функции времени или расстояния седиментации, и получила название кумулятивных или интегральных. В начальный момент седиментации исследуемое вещество может быть либо гомогенно распределено во всём объёме суспензии (способ гомогенного объёма), либо сконцентрировано в другом тонком слое суспензии, покрывающем свободную поверхность седиментационной жидкости (способ стартового слоя).

В работе анализируются возможные способы анализа как в гравитационном, так и в центробежном полях. Для каждого способа анализа получены уравнения для функций распределения частиц по размерам.

Показано, что при центробежном седиментационном анализе способом гомогенного объёма аналитическое выражение для функции распределения частиц по размерам может быть получено только в том случае, когда расстояние седиментации является переменной величиной. Если переменной величиной является время седиментации, то приходится ограничиваться приближенными решениями, степень точности которых зависит от принятых допущений.

При центробежном анализе способом стартового слоя предполагается, что в начальный момент времени все частицы исследуемого материала имеют начальную радиальную скорость, равную нулю, и находятся на одинаковом стартовом уровне от оси вращения. В отличие от анализа способом гомогенного объёма, точное решение для функции распределения при анализе способом стартового слоя может быть получено также и в случае переменного времени седиментации, что существенно упрощает технику эксперимента и математическую обработку результатов.

Наиболее простые выражения для дифференциальной функции распределения получаются для центробежного анализа способом стартового слоя в случае измерения концентрации частиц на известном уровне седиментации:

$$f(a) = \frac{4\pi l R^2 a \gamma t}{V_0} c(a), \quad (7)$$

здесь $f(a)$ — дифференциальная функция распределения объёма частиц по размерам;

$c(a)$ — измеряемая объёмная концентрация частиц размера a ;

l — толщина роторной кюветы;

V_0 — объём исследуемой пробы порошка;

γ — параметр процесса седиментации

$$\gamma = \frac{(\rho - \rho_0) \omega^2}{18\eta}. \quad (8)$$

Если анализ проводится с произвольным объёмом исследуемой пробы порошка, то функция распределения определяется по формуле:

$$f(a) = \frac{\frac{1}{a} c(a)}{\int_0^{\infty} \frac{1}{a} c(a) d(a)}. \quad (9)$$

Следует отметить, что для анализа способом стартового слоя при седиментации как в гравитационном, так и в центробежном полях уравнения для функций распределения совпадают с точностью до постоянных коэффициентов.

В главе III «Теоретические основы метода исследования дисперсных систем по характеристикам рассеяния и поглощения света» рассматривается ослабление потока излучения при прохождении света через среду, содержащую рассеивающие частицы. При этом предполагается, что рассеяние осуществляется независимыми частицами, и влиянием многократного рассеяния можно пренебречь. Так как отдельные частицы располагаются в макрообъеме хаотично или во всяком случае их взаимное расположение изменяется за время, сравнимое со временем наблюдения, то систему таких частиц можно рассматривать как собрание некогерентных излучений и складывать их интенсивности, а не поля.

Можно показать, что ослабление света в среде, содержащей монодисперсные сферические частицы, описывается уравнением:

$$\ln \frac{I_0}{I} = \frac{3}{2} \frac{Q(a)}{a} l c(a), \quad (10)$$

В случае полидисперсной среды:

$$\ln \frac{I_0}{I} = \frac{3}{2} l c_0 \int_0^{\infty} \frac{Q(a)}{a} f(a) da. \quad (11)$$

Здесь I_0 — интенсивность света, прошедшего через чистую среду;

I — интенсивность света, прошедшего через среду с рассеивающими частицами;

l — расстояние, проходимое лучом света в дисперсной среде;

c_0 — объемная концентрация дисперсной фазы;

$Q(a)$ — коэффициент экстинкции.

Интерференционные эффекты, связанные с рассеянием и поглощением света, определяются величиной коэффициента экстинкции и зависят от целого ряда условий: соотношения между размерами частиц и длиной волны излучения, формы частиц и их ориентации, оптических констант среды и частицы, состояние поляризации падающего света, телесного угла

ся, если для всего измеряемого интервала размеров частиц величина коэффициента экстинкции принимает постоянное значение. Наиболее теоретически обоснованным способом, с помощью которого можно обеспечить выполнение этого условия, является применение излучения с длиной волны значительно меньшей, чем размеры исследуемых частиц, вследствие чего значение коэффициента экстинкции выходит на геометрическую асимптоту. Для увеличения точности и воспроизводимости результатов анализа, полученных в приближениях геометрической оптики, важно установить, какие конструктивные особенности приборов влияют на характер изменения величины коэффициента экстинкции, уменьшая ее колебания около среднего значения. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, при увеличении угловой апертуры фотоприемника ход кривой, выражающей зависимость коэффициента экстинкции от размера частиц, сглаживается. Другим обстоятельством, способствующим такому сглаживанию, является применение белого света. В этом случае усреднение происходит по длинам волн спектра излучения.

Размер частицы неправильной формы и, следовательно, связанные с этим размером ее оптические свойства в системе хаотически ориентированных частиц характеризуется средним поперечным сечением. Можно показать, что для выпуклых частиц такое сечение составляет $\frac{1}{4}$ площади ее поверхности. Это позволяет выразить линейный размер частицы как диаметр эквивалентного шара, имеющего одинаковую с ней поверхность.

В процессе фотоседimentации осуществляются измерения оптической плотности среды, содержащей исследуемую дисперсную систему. Подробный анализ показывает, что с точки зрения точности измерений ряд оптических плотностей, пригодных для фотометрического анализа, ограничен как в области высоких, так и в области низких значений. Оптимальное значение оптической плотности составляет 0,4343. Для того чтобы ошибка была не слишком большой, интервал измеряемых оптических плотностей приходится ограничивать значениями, обеспечивающими заданную точность.

В главе IV «**Центробежная фотоседimentация полидисперсных систем**» рассматриваются возможные способы седиментационного анализа с использованием фотоэлектрической регистрации частиц. Показано, что при анализе способом стартового слоя расчетные уравнения для функций распределений частиц по размерам имеют наиболее простую форму, исключая

ющую необходимость дифференцирования экспериментальных функций:

$$f(a) = \frac{8}{3} \frac{\pi R^2 \ln \frac{R}{R_0}}{V_0 Q(a)} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (12)$$

В случаях, когда анализ проводится с произвольным объемом исследуемой пробы порошка, функция распределения определяется по формуле:

$$f(a) = \frac{\frac{1}{Q(a)} \ln \frac{I_0}{I}}{\int_0^{\infty} \frac{1}{Q(a)} \ln \frac{I_0}{I} da}. \quad (13)$$

Если при анализе выполняются условия, при которых коэффициент экстинкции на всём интервале измеряемых размеров частиц является постоянной величиной, которую можно вынести за знак интеграла и сократить, то это приводит к соответствующему упрощению последнего уравнения.

Рассмотрены различные варианты анализа способом гомогенного объема и получены соответствующие уравнения для функций распределения.

Существенный недостаток способа гомогенного объема состоит в том, что в расчётные формулы для дифференциальной функции распределения частиц по размерам входит дифференциал экспериментально определяемой функции. Численное или графическое дифференцирование экспериментальных функций происходит в границах известных приближений, снижающих точность анализа. Другой недостаток связан с тем, что энергичное взбалтывание, необходимое для получения суспензий с гомогенно распределенной твёрдой фазой, приводит к появлению интенсивных потоков, которые препятствуют нормальной седиментации частиц в некоторый начальный промежуток времени. Вследствие этого регистрация процесса седиментации должна начинаться после того, как действие сил вязкого трения приведёт к затуханию турбулентных потоков. К этому моменту нарушается гомогенное распределение частиц во всем объеме суспензии, что уменьшает точность измерений. Анализ способом гомогенного объема следует проводить только в тех случаях, когда по каким-либо причинам нельзя осуществить анализ способом стартового слоя.

С целью сокращения времени и повышения точности анализа материалов с широким спектром частиц разработан способ зонной седиментации частиц, основанный на седиментации частиц в двух или нескольких зонах, образующихся при последовательном введении во вращающуюся кювету жидкостей, различающихся по плотности и вязкости. При этом вначале вводится более плотная и вязкая седиментационная жидкость. Измерения седиментации фракций частиц, существенно отличающихся по размерам, проводятся во всех зонах одновременно.

Излагается новый способ фотоэлектрического определения удельной поверхности, при котором дисперсная фаза гомогенно распределяется в некотором объеме в условиях, исключающих ее дальнейшую седиментацию. Это позволяет значительно сократить время измерений и, кроме того, делает возможным определение удельной поверхности для материалов, частицы которых имеют различную плотность, что является важным достоинством этого способа.

Расчет удельной поверхности σ производится по уравнению

$$\sigma = \frac{k}{c_0} \lg \frac{I_0}{I}, \quad (14)$$

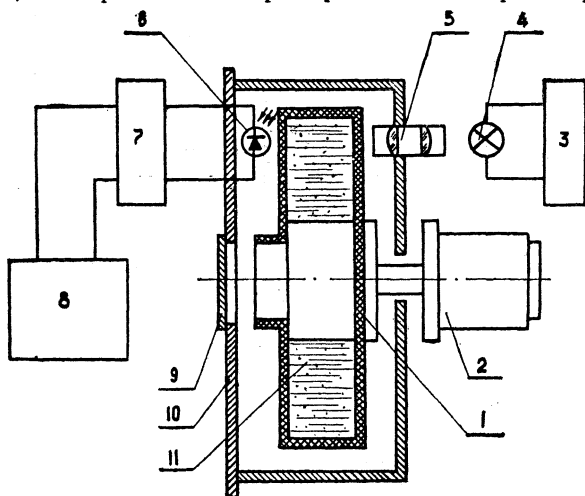
где k — приборная константа.

Отсутствие седиментации частиц снижает требования к быстродействию измерительной системы и позволяет с успехом применить рентгеновское или радиоактивное излучение.

Глава V. «Экспериментальные исследования работы центробежного фотоседиментографа».

Для проведения экспериментальных работ была разработана и изготовлена установка для гранулометрического анализа полидисперсных материалов в поле центробежных сил — центробежный фотоседиментограф, основные элементы которого изображены на рис. 1. Анализ способом стартового слоя осуществляется следующим образом. Во вращающуюся вокруг горизонтальной оси электродвигателя 2 полую роторную кювету 1, изготовленную из прочного, прозрачного для световых лучей материала, через окно заливается определенное количество седиментационной жидкости 11. Под действием центробежных сил свободная поверхность жидкости принимает при достаточно быстром вращении форму коаксиального цилиндра. Затем на свободную поверхность вращающейся седиментационной жидкости вводится тонкий слой, порядка 3 мм, буфер-

ной жидкости, имеющей меньшую плотность, чем седиментационная. В момент времени, принимаемый за начальный, через окно в кювету вводится небольшое количество исследуемой суспензии, которая благодаря вращению хорошо распреде-



БЛОК-СХЕМА ЦЕНТРОБЕЖНОГО
ФОТОСЕДИМЕНТОГРАФА

Рис. 1

ляется на поверхности буферной жидкости тонким стартовым слоем, из которого начинается седиментация частиц. Так как толщина стартового слоя мала по сравнению с расстояниями до него как от оси вращения, так и от уровня измерения, то в зоне регистрации в каждый момент времени находится только одна монодисперсная фракция, что увеличивает точность анализа. Свет от осветителя 4, питаемого источником стабилизированного напряжения 3, формируется оптической системой 5 в тонкий параллельный пучок, который проходит через кювету и попадает на фотоэлемент 6. Фототок, пропорциональный световому потоку, снимается с регулируемого сопротивления 7, с помощью которого устанавливается начальное значение вели-

чины фототока, регистрируемого самопишущим электронным потенциометром 8. Кожух 10 и крышка 9 предохраняют фотоэлемент от воздействия посторонних источников света и обеспечивают безопасность работы на центрифуге.

При анализе способом гомогенного объема в роторную кювету следует поместить радиальную перегородку для того, чтобы в начальный момент времени быстро привести во вращение весь объем исследуемой суспензии.

Вращение кюветы происходит вокруг горизонтальной оси и действие сил центробежного и гравитационного полей лежит в одной вертикальной плоскости, что исключает движение частиц по дну роторной кюветы.

Электропривод центрифуги выполнен по системе электромашиный усилитель — двигатель (ЭМУ-Д) и позволяет регулировать скорость вращения в интервале от 100 до 2000 об/мин. Центрифуга снабжена поворотным устройством, с помощью которого можно изменять положение оси вращения кюветы при её заполнении жидкостью и опорожнении. Скорость вращения кюветы устанавливается с помощью стробоскопического тахометра типа СТ-5.

Для экспериментальной проверки теоретических предположений, лежащих в основе метода фотоседиментации, проводились исследования зависимости между оптической плотностью суспензии и дисперсными характеристиками взвешенной в ней твердой фазы. Исследования показали, что в интервале концентраций дисперсной фазы, в котором осуществляется фотоседиментационный анализ, для одного и того же порошка эта зависимость имеет линейный характер. Во второй серии измерений наряду с оптической плотностью определялась также с помощью прибора ПСХ-4 удельная поверхность порошков по методу Козени-Кармана. На результатах измерений, проведенных этим методом, слабо сказывается влияние внутренней пористости частиц и величина удельной поверхности определяется, в основном, их геометрическими размерами. Эксперименты подтвердили существование линейной зависимости между оптической плотностью и удельной поверхностью порошков.

Исследование работы центробежного фотоседиментографа ставило своей целью выяснение условий, повышающих эффективность гранулометрического анализа способом стартового слоя. Специфическая особенность этого способа состоит в необходимости быстрого введения суспензии с исследуемым материалом во вращающуюся седиментационную жидкость. Как показали опыты, при этом может возникнуть неустойчивое турбулентное движение жидкости, нарушающее нормальную

седиментацию частиц. Стробоскопическое наблюдение такой картины выявляет своеобразные «протуберанцы», направленные к периферии роторной кюветы. Чтобы стабилизировать движение частиц, необходимо исключить резкое повышение концентрации частиц на границе раздела жидких фаз, что может быть достигнуто соответствующим изменением физической структуры этой границы. Наиболее эффективным способом, с помощью которого решается эта задача, является создание на поверхности вращающейся седиментационной жидкости тонкого слоя другой жидкости, меньшей плотности, выполняющего роль буфера.

Кратковременное и небольшое изменение скорости вращения роторной кюветы способствует исчезновению четкой поверхности раздела между седиментационной и буферной жидкостями и приводит к появлению тонкого промежуточного слоя с плавным, монотонным изменением градиента плотности. Такой буферный слой предотвращает возникновение турбулентных вихрей, нарушающих нормальную седиментацию частиц при введении суспензии с исследуемым материалом на поверхность буферной жидкости.

В работе рассмотрено влияние конечной толщины стартового слоя и времени его введения на точность анализа.

Конечное значение толщины ΔR_0 стартового слоя приводит к тому, что в зоне измерения будут находиться не монодисперсные частицы, а фракции, в которой размеры частиц распределены в некотором интервале от a до $a + \Delta a$. Относительное отклонение размеров частиц этой фракции от расчётной величины равно

$$\frac{\Delta a}{a} = - \frac{\Delta R_0}{2R_0 \ln \frac{R}{R_0}} \quad (15)$$

В наших опытах это отклонение составляло пренебрежимо малую величину порядка $1,3 \cdot 10^{-2}$.

Время Δt , в течение которого вводится суспензия, приводит к относительному отклонению размеров

$$\frac{\Delta a}{a} = - \frac{\Delta t}{2t} \quad (16)$$

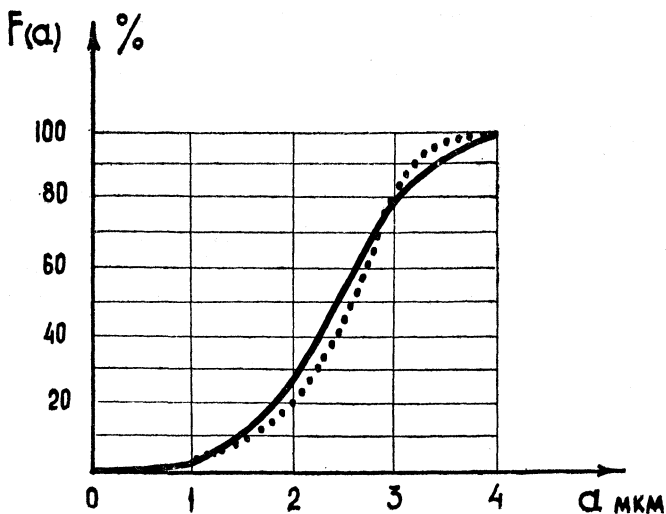
Из этого уравнения видно, что максимальное отклонение будет у самых крупных частиц, которые достигают зоны измерения в кратчайшее время. Выбором соответствующих пара-

метров седиментации, увеличивая время t появления первого сигнала, можно относительное отклонение размеров частиц от расчётной величины сделать сколь угодно малым. В наших опытах это отклонение не превышало величины порядка 0,05, которой вполне можно пренебречь.

Разработан способ ультразвукового диспергирования порошков при их подготовке для гранулометрического анализа. Ультразвуковая обработка существенно повышает агрегативную устойчивость суспензий.

Всесторонние исследования работы центробежного фотоседиментографа и сравнение с другими методами показали высокую точность и воспроизводимость результатов анализа, полученных способом стартового слоя.

На рис. 2. представлены интегральные функции распреде-



**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА ВОЛЬФРАМА**

- ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ФОТОСЕДИМЕНТОГРАФ
- ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

рис. 2

ления, полученные при анализах на центробежном фотоседиментографе и оптическом микроскопе порошка вольфрама, частицы которого имели сферическую форму, что в значительной

мере способствовало близкому совпадению результатов.

Исследование воспроизводимости результатов показало, что среднеквадратичное отклонение не превышает величины 0,01.

Можно отметить еще одно достоинство способа стартового слоя, состоящее в том, что регистрируемый электронным потенциометром график фототока является, по существу, как это видно из формулы (12), масштабным преобразованием дифференциальной функции распределения частиц по объему. Это позволяет легко определить такие важные параметры исследуемой дисперсной системы, как максимальный размер частиц и моду распределения. Максимальному размеру частиц соответствует на графике (см. рис. 3) начало изменения величины

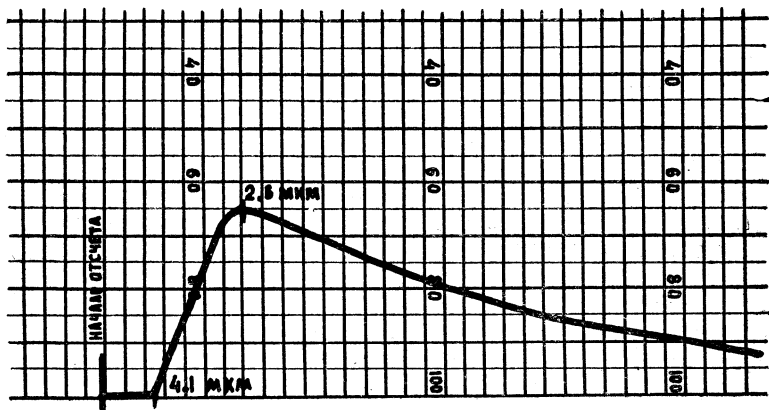


ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ФОТОТОКА

рис. 3

фототока, а моде распределения — точка экстремума. Во многих случаях эти размеры являются основными показателями качества порошков.

Проведенные исследования показали, что центробежная фотоседimentация способом стартового слоя позволяет осуществить быстрый и эффективный анализ и контроль дисперсности порошковых материалов, а в условиях массового производства может оказаться весьма перспективной для автоматизации этих операций. Этому способствует то обстоятельство, что только способ стартового слоя позволяет провести в одной и той же седиментационной жидкости без остановки вращения

роторной кюветы последовательно несколько анализов. При этом каждая следующая проба вводится после полного осаждения предыдущей.

Среднеквадратичное отклонение результатов для четырех последовательно проведенных анализов порошка молибдена составляет около 0,02.

Особое положение, которое занимает способ стартового слоя в ряду известных методов седиментационного анализа, связано с тем, что вычисление функции распределения частиц по размерам не сопряжено с дифференцированием экспериментальных кривых. Для сравнения укажем, что при использовании кумулятивных методов, связанных с накоплением осадка, для вычисления дифференциальной функции распределения требуется дважды дифференцировать экспериментальную функцию.

Центробежный фотоседиментограф может найти широкое применение не только в порошковой металлургии, но и в других производствах, а также для научных исследований.

Во многих случаях получение различных тонкодисперсных порошков связано с операциями дробления и помола, в результате которых продукты измельчения засоряются примесями железа вследствие износа рабочих деталей измельчающих механизмов. В технологический процесс многих производств включены операции по очистке продуктов измельчения от примесей железа методом магнитной сепарации. Общепринятый способ контроля качества магнитной сепарации основан на весьма неточной и субъективной оценке количества железа, которое извлекается из тонкодисперсных немагнитных порошков с помощью контрольного постоянного магнита. В работе описывается разработанный нами и внедренный в производство метод определения ферромагнитных примесей в немагнитных порошках взвешиванием в неоднородном магнитном поле, обеспечивающий быстрый и точный анализ. В основе метода лежит теоретически обоснованная зависимость, существующая между магнитной восприимчивостью порошков и концентрацией в них ферромагнитных примесей. Магнитная восприимчивость измеряется с помощью магнитных весов по силе, с которой исследуемое вещество втягивается в магнитное поле. Дано теоретическое обоснование метода, описана разработанная установка и приведены результаты экспериментального исследования ее работы.

ВЫВОДЫ

1. Предложен и теоретически обоснован фотоседиментационный способ исследования полидисперсных материалов в поле центробежных сил.

2. В результате совместного решения задачи движения частицы во вращающейся вязкой жидкости и рассеяния света малыми частицами получены уравнения для функций распределения частиц по размерам при различных вариантах центробежного фотоседиментационного анализа.

3. Предложен и теоретически обоснован способ центробежной классификации порошков.

4. На основе теории ослабления света в мутных средах разработан фотометрический способ определения удельной поверхности дисперсных систем. Отсутствие седиментации частиц позволяет значительно сократить время измерений, а также анализировать многокомпонентные материалы, частицы которых имеют разную плотность.

5. Разработан способ зонной седиментации для гранулометрического анализа порошков с широким спектром размеров частиц.

6. На основе способа центробежной фотоседиментации разработана и изготовлена установка для гранулометрического анализа тонких полидисперсных материалов — центробежный фотоседиментограф.

7. Проведены экспериментальные исследования работы центробежного фотоседиментографа, которые показали высокую эффективность анализа способом стартового слоя. Установлены критерии точности при анализе этим способом. Разработана методика анализа с буферным слоем.

8. Разработан способ ультразвукового диспергирования порошков в суспензии для гранулометрического анализа, существенно повышающей агрегативную устойчивость суспензий, что приводит к увеличению точности и воспроизводимости результатов анализа.

9. Разработаны и внедрены для промышленного применения способ и установка для определения ферромагнитных примесей в немагнитных продуктах измельчения.

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ИЗДАНИЯХ:

1. З. И. Абарбанель. «Центробежный фотоседиментограф для гранулометрического анализа полидисперсных материалов». Сб. «Электронная техника», сер. 14, вып. 6, 1968.

2. З. И. Абарбанель. «Способ и устройство для гранулометрического анализа полидисперсных материалов». Сб. «Охлаждение отливки». Физико-технический институт АН БССР, Изд-во «Наука и техника». Минск, 1969.

3. З. И. Абарбанель, И. Я. Винер. «О седиментации частиц в поле центробежных сил», Известия ВУЗов, сер. «Физика», № 5, 1969.

4. З. И. Абарбанель, П. Д. Иванов. «Метод определения процентного содержания ферромагнитных примесей в дисперсных керамических материалах в условиях производства». Сб. «Электронная техника», сер. 14, вып. 2, 1969.

5. З. И. Абарбанель. «Седиментационный анализ тонких полидисперсных материалов». «Порошковая металлургия», № 10, 1969.

6. С. Е. Савицкий, В. И. Уродов, З. И. Абарбанель, С. Г. Ковчур. «Исследование полидисперсных систем физическими методами». Изд-во БГУ, Минск, 1971.

7. В. А. Саморосов, Г. М. Кац, З. И. Абарбанель. Автор свид. 189686 «Гидравлический пресс для изготовления изделий из порошковых масс, например, масс для пьезокерамики». Бюлл. изобр. № 24, 1966.

8. З. И. Абарбанель. Автор свид. 254818 «Устройство для измерения гранулометрического состава полидисперсных материалов». Бюлл. изобр. № 32, 1969.

9. З. И. Абарбанель. Автор. свид. 260280 «Способ гранулометрического анализа полидисперсных материалов». Бюлл. изобр. № 3, 1970.

10. З. И. Абарбанель, С. Е. Савицкий, В. И. Уродов, Е. Г. Садовников. «Определение спектра частиц тонких полидисперсных систем». Труды Витебского технологического института легкой промышленности, т. 1, Витебск, 1970.

11. З. И. Абарбанель, С. Г. Ковчур. «Фотометрический способ определения удельной поверхности порошков». Труды Витебского технологического института легкой промышленности, т. 1, Витебск, 1970.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях, семинарах и совещаниях:

1. IX Всесоюзное совещание по порошковой металлургии. Рига, май, 1968.

2. Республиканская научно-техническая конференция. Брест, ноябрь, 1968.

3. Совещание по порошковой металлургии в Московском институте стали и сплавов. Москва, декабрь, 1968.

4. Научный семинар в Институте проблем материаловедения АН СССР, Киев, март, 1969.

5. Научно-техническая конференция в Белорусском политехническом институте. Минск, апрель 1969.

6. Всесоюзная школа-симпозиум по оптике рассеивающих сред. Минск-Святая, июнь, 1969.

7. III научно-техническая конференция в Витебском технологическом институте легкой промышленности. Витебск, март, 1970.

8. IV научно-техническая конференция в Витебском технологическом институте легкой промышленности. Витебск, март, 1971.