

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

Кафедра коллоидной химии
Кафедра высокоэнергетических процессов

Д. В. Королев, В. Н. Наумов, К. А. Суворов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА
ПОРОШКОВ МИКРОСКОПИЧЕСКИМ
МЕТОДОМ**

Методические указания к лабораторной работе

Санкт-Петербург
2005

УДК 620.186.82(543.068.8)

Королев Д. В., Наумов В. Н., Суворов К. А. Определение дисперсного состава порошков микроскопическим методом: Методические указания к лабораторной работе. — СПб.: ГОУ ВПО СПбГТИ(ТУ), 2005. — 41 с.

Описана методика определения дисперсного состава порошков микроскопическим методом. Изложение материала пояснено примерами конкретных расчетов.

Методические указания предназначены для студентов III курса, изучающих курс «Поверхностные явления и дисперсные системы», студентов старших курсов, обучающихся на кафедре высокоэнергетических процессов, и по другим химико-технологическим специальностям. Могут быть полезны студентам, аспирантам, преподавателям и научным сотрудникам, занимающимся переработкой и изучением порошкообразных материалов, специализирующимся в области порошковой металлургии, композиционных материалов, кристаллографии и дефектоскопии.

Рис. 7, табл. 17, библиогр. 6 назв., прил. 1

Рецензент: В. Б. Осташев, кандидат технических наук,
доцент кафедры общей физики ГОУ ВПО
СПбГТИ(ТУ)

Утверждены на заседании учебно-методической комиссии химического отделения 06.10.2005.

Рекомендованы к изданию РИСо ГОУ ВПО СПбГТИ(ТУ).

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОПИСАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1 Методы определения дисперсного состава порошков	5
1.2 Характеристики дисперсных материалов	5
1.3 Функции распределения и их графическое изображение	6
1.4 Расчет параметров распределения частиц по размерам	8
1.5 Пример расчета и построения кривых распределения	13
1.6 Статистические распределения, используемые для описания дисперсного состава порошков	17
1.7 Расчет параметров статистических распределений	19
2 ХОД АНАЛИЗА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ	26
2.1 Подготовка проб порошков	26
2.2 Рекомендации по выбору увеличения микроскопа и измерению размеров частиц	26
2.3 Последовательность выполнения работы	29
2.4 Составление отчета о лабораторной работе	29
2.5 Пример отчета о лабораторной работе	30
3 ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА	32
3.1 Описание установки	32
3.2 Последовательность выполнения работы	33
ЛИТЕРАТУРА	34
ПРИЛОЖЕНИЕ (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ). ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ LITTLE 2	35

ВВЕДЕНИЕ

Порошкообразные материалы применяются во многих отраслях промышленности. Многие свойства порошков в значительной степени зависят от дисперсности. Анализ дисперсного состава является обязательным методом контроля во всех технологических процессах, связанных с изготовлением и переработкой порошкообразных материалов. В связи с этим становится понятным большое значение анализа дисперсного состава порошков для науки, техники и технологии.

В настоящее время существует несколько методов определения дисперсного состава измельченных материалов: ситовой анализ, седиментационный анализ, гидродинамические методы, микроскопический анализ. В этом ряду микроскопический метод выгодно отличается тем, что позволяет определить не только геометрические размеры исследуемых объектов, но и увидеть особенности их формы, структуры и строения поверхности. Последнее обстоятельство весьма важно в тех случаях, когда порошки используются в дальнейшем для приготовления реакционноспособных гетерогенных смесей.

Микроскопический метод позволяет измерять частицы размером 0,3—100 мкм. Для определения размера частиц меньше 1 мкм применяют электронные микроскопы с более высокой разрешающей способностью, чем оптические.

Недостатком микроскопического метода анализа является его чрезвычайная трудоемкость. Достоверные результаты определения размеров частиц микроскопическим методом могут быть получены только при замерах нескольких сотен частиц. Вследствие этого продолжительность микроскопического анализа может составлять несколько часов. Этот недостаток достаточно легко устраняется с помощью современных компьютерных технологий. Применение компьютерной техники позволяет достаточно быстро определить не только средний размер частиц порошка, но и установить параметры закона распределения, наилучшим образом описывающего дисперсный состав порошкообразного материала.

1 ОПИСАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Методы определения дисперсного состава порошков

Существует различные методы определения дисперсности порошков [1—6]. Согласно принятой классификации [6] все методы можно разделить на группы:

— механическое разделение частиц, включающее ситовой и фильтрационный анализ;

— седиментационный анализ, включающий пофракционное осаждение, отмучивание, накопление осадка, отбор весовых проб;

— динамические методы, основанные на сепарации в потоке в вертикальных сосудах и центробежных аппаратах;

— индивидуальное изучение частиц, включающее микроскопический и ультрамикроскопический анализ;

— определение удельной поверхности, включающее адсорбционный метод, по скорости растворения и др.

Наиболее распространенными методами экспресс-анализа дисперсного состава порошков являются ситовой и микроскопический [3]. В результате ситового анализа получают гистограммы распределения массы частиц по размерам, в результате микроскопического — гистограммы распределения количества частиц по размерам.

1.2 Характеристики дисперсных материалов

Для описания дисперсных материалов наибольшее распространение получили следующие основные понятия.

Размер (диаметр, радиус) частицы, мкм. Размер, определяющий крупность частицы: диаметр, радиус, длину стороны частицы или сита, через которое проходит частица, наибольший размер проекции частицы и т. д. Точно характеризует только идеальные, шарообразные частицы.

Эквивалентный диаметр (радиус) частицы, мкм. Размер частицы, не имеющей правильной геометрической формы. Применяются следующие понятия эквивалентного диаметра:

— диаметр шара, объем которого равен объему частицы;
— диаметр круга, площадь которого равна площади проекции частицы.

В микроскопическом анализе принято использовать последний.

Полная поверхность, см². Площадь граничной поверхности твердой фазы и дисперсионной среды, включая поверхность открытых наружу трещин и пор.

Внешняя поверхность, см². Поверхность частиц, зависящая от геометрической формы, без учета поверхности открытых наружу мелких трещин и пор.

Удельная поверхность, см²/г или см²/см³ (в системе СИ м²/м³). Отношение поверхности частиц к их массе или объему.

Кажущаяся плотность, г/см³ или кг/м³. Масса единицы объема частиц, включая объем закрытых пор.

Объемная плотность, г/см³ или кг/м³. Масса единицы объема частиц, включая объем закрытых пор.

Насыпная плотность, г/см³ или кг/м³. Масса единицы объема порошкообразного материала, рыхло насыпанного в какую-либо емкость непосредственно после ее заполнения. В объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между частицами.

Дисперсный (гранулометрический) состав порошка (характеристика состава, распределение частиц порошка по размерам). Он показывает, какую долю по массе, объему или числу составляют частицы в любом диапазоне их размеров. Характеристика дисперсного состава может быть задана в виде таблицы, кривой или формулой, выражающей функцию распределения или плотности распределения частиц.

Степень дисперсности. Качественный показатель, характеризующий размер частиц порошка.

1.3 Функции распределения и их графическое изображение

Порошки, как продукты измельчения материалов, состоят из частиц, имеющих неправильную геометрическую форму и разные размеры.

Дисперсный состав измельченного материала удобно описывать интегральной функцией распределения $D(\delta)$ количества материала по размерам частиц δ или связанной с ней функцией $R(\delta)$. Функция $D(\delta)$ равна выраженному в процентах или в долях отношению всех частиц, диаметр которых меньше δ , к общему количеству материала. Функция $R(\delta)$ определяется как выраженное в процентах отношение количества всех частиц, диаметр которых больше δ , к общему количеству материала. Например, при ситовом анализе кривая D — это доля порошка, прошедшая сквозь сито с ячейкой δ , а кривая R — доля порошка, оставшаяся на сите. При этом выполняется соотношение:

$$D + R = 100\%. \quad (1)$$

Графически функции распределения изображаются в виде кривых распределения. По оси абсцисс откладываются значения диаметра частиц δ , а по оси ординат процентное содержание всех частиц, диаметр которых больше или меньше δ , т. е. значения функций $R(\delta)$ или $D(\delta)$ (рис. 1).

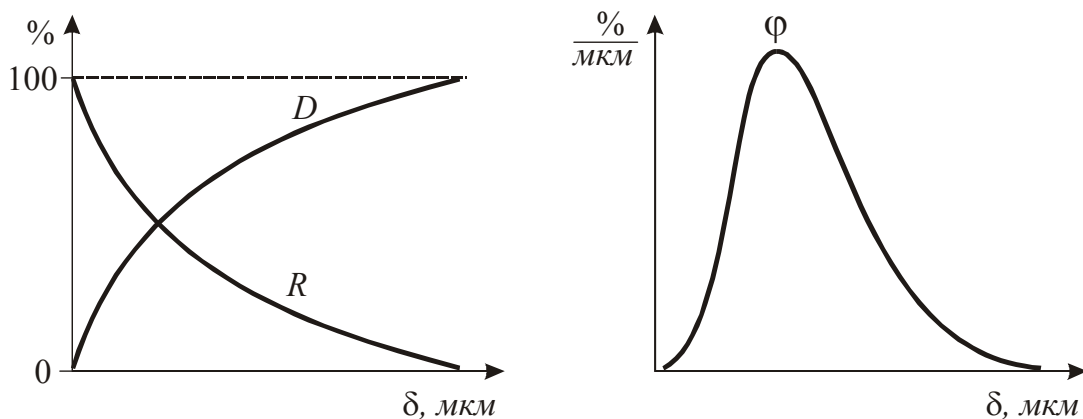


Рисунок 1 — Общий вид функций D , R , φ

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения $\varphi(\delta)$:

$$\varphi(\delta) = dD(\delta) / d\delta = -dR(\delta) / d\delta. \quad (2)$$

При этом выполняется соотношение

$$\int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \varphi(\delta) d\delta = D(\delta_{\max}) - D(\delta_{\min}). \quad (3)$$

Кривые распределения D и R могут быть получены путем последовательного суммирования и накопления процентного содержания частиц различных размеров.

Процентные содержания отдельных фракций, полученных в результате анализа, изображаются в виде гистограммы (рис. 2), которая дает наглядное представление о дисперсном составе порошкообразного материала. По оси абсцисс откладываются размеры частиц, а по оси ординат — относительные содержания фракций, т. е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к «ширине» фракции в мкм.

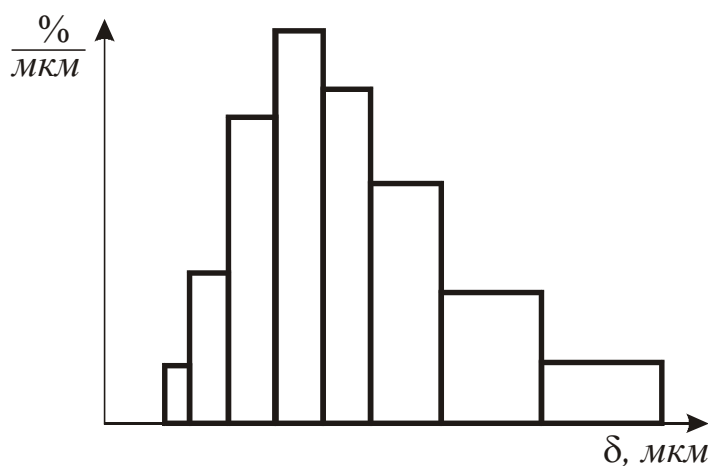


Рисунок 2 — Общий вид гистограммы

Для аналитического описания кривых распределения и плотности распределения измельченных материалов применяются различные формулы, которые получаются в результате анализа дисперсного состава. Они бывают одно-, двух- и трехпараметрическими и могут быть разделены на теоретические и эмпирические [6].

1.4 Расчет параметров распределения частиц по размерам

А. Расчет функции распределения числа частиц по размерам

При анализе дисперсного состава данные, обычно, получают в виде таблицы (см. табл. 1)

При обработке экспериментальных данных определяют процентное содержание частиц каждой фракции (см. табл. 2)

$$Q_i = \frac{N_i}{\sum N} 100, \quad (4)$$

где N_i — число частиц данной фракции;
 $\sum N$ — суммарное число частиц.

Таблица 1 — Экспериментальные данные

Фракция	Число частиц			Количество частиц во всех полях зрения
	I поле	...	n поле	
$\delta \leq \delta_1$ $\delta_1 < \delta \leq \delta_2$ $\delta_2 < \delta \leq \delta_3$ и т. д.				$\sum N$

Таблица 2 — Данные для построения интегральной кривой распределения числа частиц по размерам

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц данной фракции N	Процентное содержание фракции Q , %	Нарастающее суммарное содержание фракций D , $Q_0 + Q_1 + \dots$, %
$\delta \leq \delta_1$ $\delta_1 < \delta \leq \delta_2$ $\delta_2 < \delta \leq \delta_3$ и т. д.		$Q_0 =$ $Q_1 =$ $Q_2 =$	
	$\sum N$	$\sum Q = 100\%$	

По данным таблицы 2 строят интегральную кривую распределения (см. рис. 1, 3).

Начинают построение с самых мелких частиц, откладывая их процентное содержание (Q_0) на ординате; затем для частиц следующей фракции (δ_1), откладывают ординату, равную сумме процентного содержания частиц предыдущей фракции (δ_0) и фракции с радиусом δ_1 : $D = Q_0 + Q_1$; далее поступают аналогичным образом, откладывая на ординате нарастающее суммарное содержание частиц от наименьшего до данного диаметра включительно. Таким образом, последняя ордината (соответствующая максимальному диаметру) составит 100%.

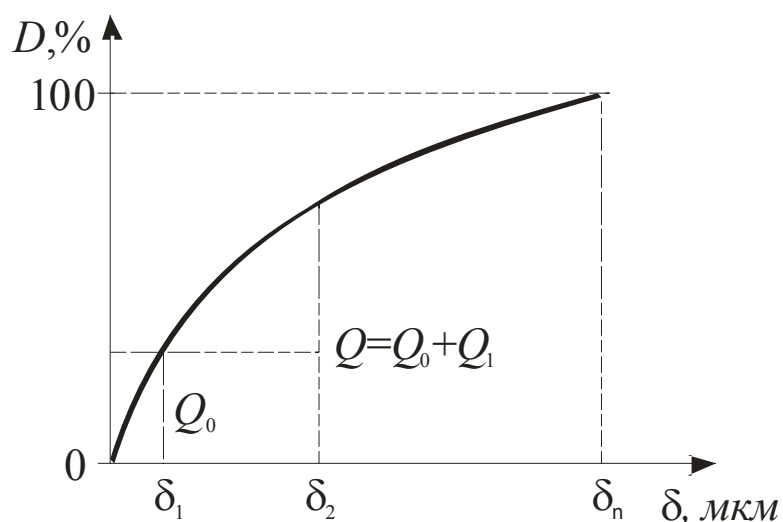


Рисунок 3 — Построение интегральной кривой распределения

Величину эквивалентного диаметра, соответствующую максимальному числу частиц в данной системе, находят из дифференциальной кривой распределения, для построения которой обрабатывают интегральную кривую следующим образом: через равные интервалы диаметров, которые выбирают произвольно*, строят ординаты до пересечения с интегральной кривой и находят значения ΔD — приращение процентного содержания частиц в выбранном интервале диаметров $\Delta\delta$ (очевидно, ΔD равна разности двух соседних ординат). Полученные таким образом данные заносят в таблицу 3.

Примечание: * — число отрезков, на которые разбивают абсциссу рекомендуется выбирать равным 10.

Таблица 3 — Пример данных для построения дифференциальной кривой распределения

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %										
$\Delta D/\Delta\delta$										

Затем, откладывая на оси абсцисс значения эквивалентного диаметра δ , а по оси ординат — функцию распределения $\Delta D/\Delta\delta$, строят прямоугольники, беря за их основания равные интервалы диаметров $\Delta\delta$, а за высоту — $\Delta D/\Delta\delta$.

Соединив плавной кривой середины верхних оснований прямоугольников, получают дифференциальную кривую распре-

деления, по которой можно определить диаметр частиц, которых больше всего в данной дисперсной системе, наиболее вероятный радиус (рис. 4).

Площадь каждого прямоугольника представляет собой процентное содержание фракции с определенным интервалом размера частиц. Площадь, описываемая кривой, должна быть равна сумме площадей всех прямоугольников.

По форме дифференциальная кривая чаще всего представляет статистическую кривую распределения с одним максимумом, но она может быть и другой: это зависит от характера дисперсной системы.

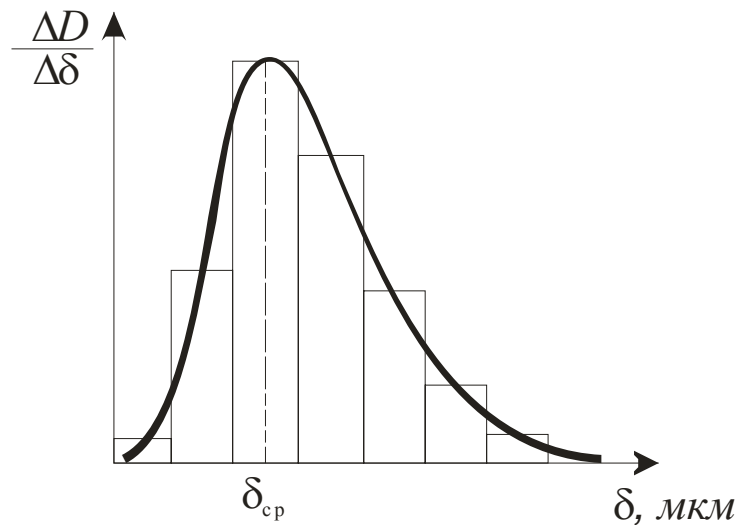


Рисунок 4 — Построение интегральной кривой распределения

Б. Расчет функции распределения объема частиц по размерам

При этом методе расчета каждую частицу считают сферической, а ее объем рассчитывают по формуле

$$v = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (5)$$

и общий объем частиц данной фракции

$$V = vN, \quad (6)$$

где v — объем одной частицы диаметром d ;

N — число частиц данной фракции.

Затем определяют процентное содержание объема частиц данной фракции по отношению к их общему объему

$$Q = \frac{V}{\sum V} 100. \quad (7)$$

Полученные результаты записывают в таблицу 4.

По данным таблицы 4 строят интегральную и дифференциальную кривые распределения, руководствуясь указаниями раздела А.

Таблица 4 — Данные для построения интегральной кривой распределения объема частиц по размерам

Диаметр частиц δ , мкм	δ^3 , мкм ³	Объем одной частицы v_3 , мкм ³	Количество частиц одной фракции N	Общий объем частиц данной фракции V , мкм ³	Процентное содержание фракции Q , %	Нарастающее суммарное содержание D , $Q_0+Q_1+\dots$, %
$\delta \leq \delta_1$					$Q_0 =$	
$\delta_1 < \delta \leq \delta_2$					$Q_1 =$	
$\delta_2 < \delta \leq \delta_3$					$Q_2 =$	
и т. д.						
			ΣN	ΣV	$\Sigma Q = 100\%$	

В. Расчет функции распределения поверхности раздела фаз по размерам

При этом методе расчета также каждую частицу считают сферической, а ее поверхность рассчитывают по формуле

$$s = \frac{\pi d^2}{3} \quad (8)$$

и общую поверхность частиц данной фракции

$$S = sN, \quad (9)$$

где s — поверхность одной частицы диаметром d ;
 N — число частиц данной фракции.

Затем определяют процентное содержание поверхности частиц данной фракции по отношению к их общей поверхности

$$Q = \frac{S}{\sum S} 100. \quad (10)$$

Полученные данные записывают в таблицу 5.

По данным таблицы 5 строят интегральную и дифференциальную кривые распределения, руководствуясь указаниями раздела А.

Таблица 5 — Данные для построения интегральной кривой распределения поверхности частиц по размерам

Диаметр частиц δ , мкм	δ^3 , мкм ³	Поверхность одной частицы s , мкм ³	Количество частиц одной фракции N	Общая поверхность частиц данной фракции S , мкм ³	Процентное содержание фракции Q , %	Нарастающее суммарное содержание D , $Q_0+Q_1+\dots$, %
$\delta \leq \delta_1$ $\delta_1 < \delta \leq \delta_2$ $\delta_2 < \delta \leq \delta_3$ и т. д.					$Q_0 =$ $Q_1 =$ $Q_2 =$	
			ΣN	ΣS	$\Sigma Q = 100\%$	

1.5 Пример расчета и построения кривых распределения

Результаты микроскопического анализа приведены в таблице 6, результаты расчетов — в таблице 7. Интегральная кривая распределения, построенная по данным таблицы 7 показана на рисунке 5 а. В таблице 8 приведены данные для построения дифференциальной кривой распределения, полученные при обработке интегральной кривой.

Как видно из данных таблицы 8 и построенной по ней дифференциальной кривой (см. рис. 5 а), максимум ее приходится на 1 мкм.

Путем обработки тех же экспериментальных данных (табл. 6) можно получить результаты распределения объема частиц по размерам (табл. 9).

Данные для построения дифференциальной кривой распределения объема частиц по размерам показаны в таблице 10.

Таблица 6 — Результаты микроскопического анализа

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц						Число частиц во всех полях зрения N
	I поле	II поле	III поле	IV поле	V поле	IV поле	
0,75	38	50	37	50	44	56	275
2,25	20	31	14	20	16	16	117
3,75	8	11	1	11	8	11	50
5,25	-	3	1	2	4	3	13
6,75	2	1	2	1	2	-	8
8,25	-	1	2	2	-	2	7
9,75	2	2	-	1	1	-	6
11,25	1	1	-	2	-	2	6
12,75	-	2	-	1	2	-	5
14,25	1	1	1	1	1	-	5
15,75	-	-	1	-	-	1	2
17,27	-	-	-	1	-	-	1
18,75	-	1	-	-	-	1	2
20,25	-	-	-	-	-	-	0
21,75	-	-	-	-	1	-	1
							$\Sigma N = 497$

Таблица 7 — Данные для построения интегральной кривой распределения числа частиц по размерам

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц данной фракции N	Процентное содержание фракции Q , %	Нарастающее суммарное содержание фракций D , %
0,75	275	55,4	55,4
2,25	117	23,6	79,0
3,75	50	10,0	89,0
5,25	13	2,6	91,6
6,75	8	1,6	93,2
8,25	7	1,4	94,6
9,75	6	1,2	95,8
11,25	6	1,2	97,0
12,75	5	1,0	98,0
14,25	5	1,0	99,0
15,75	2	0,4	99,4
17,27	1	0,2	99,6
18,75	1	0,2	99,8
20,25	0	0	99,8
21,75	1	0,2	100
	$\Sigma N = 497$	$\Sigma Q = 100\%$	

Таблица 8 — Данные для построения дифференциальной кривой распределения числа частиц по размерам

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %	76	14	3	2	1,5	1,5	1	1	1
$\Delta D/\Delta\delta$	38,0	7,0	1,5	1,0	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5

Таблица 9 — Данные для построения интегральной кривой распределения объема частиц по размерам

Диаметр частиц δ , мкм	δ^3 , мкм ³	Объем одной частицы v_3 , мкм ³	Количество частиц одной фракции N	Общий объем частиц данной фракции V , мкм ³	Процентное содержание фракции Q , %	Нарастающее суммарное содержание D , %
0,75	0,4	0,2	275	60,7	0,1	0,1
2,25	11,4	6,0	117	697,4	1,6	1,8
3,75	52,7	27,6	50	1379,8	3,2	5,0
5,25	144,7	75,7	13	984,5	2,3	7,4
6,75	307,5	160,9	8	1287,6	3,0	10,4
8,25	561,5	293,9	7	2057,0	4,8	15,2
9,75	926,9	485,1	6	2910,3	6,9	22,1
11,25	1423,8	745,1	6	4470,8	10,5	32,6
12,75	2072,7	1084,7	5	5423,5	12,8	45,4
14,25	2893,6	1514,3	5	7571,7	17,8	63,2
15,75	3907,0	2044,7	2	4089,3	9,6	72,8
17,27	5150,8	2695,6	1	2695,6	6,3	79,2
18,75	6591,8	3449,7	1	3449,7	8,1	87,3
20,25	8303,8	4345,6	0	0	0,0	87,3
21,75	10289,1	5384,6	1	5384,6	12,7	100,0
			$\Sigma N =$ 497	$\Sigma V =$ 339692	$\Sigma Q = 100\%$	

Таблица 10 — Данные для построения дифференциальной кривой распределения объема частиц по размерам

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %	2	2	5	6	9	14	16	15	14	10	7
$\Delta D/\Delta\delta$	1,0	1,0	2,5	3,0	4,5	7,0	8,0	7,5	7,0	5	3,5

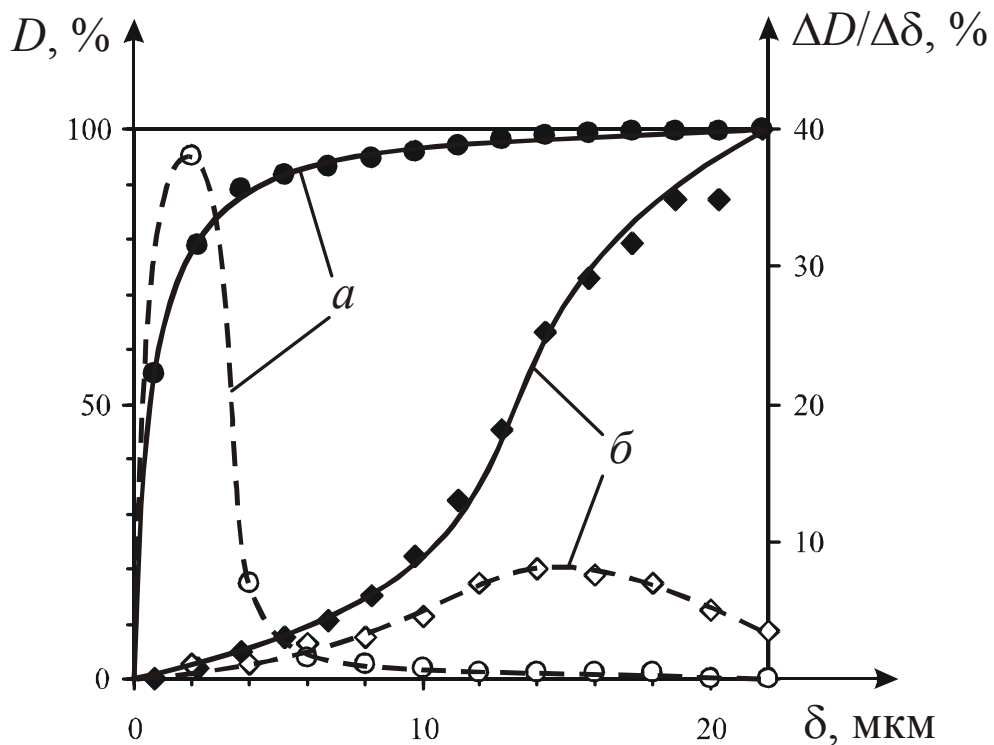


Рисунок 5 — Интегральные и дифференциальные кривые распределения частиц по размерам: *a* — по числу частиц; *b* — по объему частиц

1.6 Статистические распределения, используемые для описания дисперсного состава порошков

Для описания дисперсного состава порошков на практике в основном применяются четыре формулы: Годена-Андреева, Розина-Раммлера, нормального (НР) и логарифмически нормального законов распределения (ЛНР) [6].

Формула Годена-Андреева, выведенная на основе обобщения результатов ситового анализа минералов, измельченных на различном производственном оборудовании, имеет вид

$$D(\delta) = 0,8 \left(\frac{\delta}{A} \right)^l. \quad (11)$$

Параметр l характеризует направление и степень изгиба кривой распределения: при $l=1$ кривая превращается в прямую линию; при $l < 1$ кривая $D(\delta)$ выпуклая; при $l > 1$ кривая $D(\delta)$ вогнутая.

При ее дифференцировании получается функция плотности распределения

$$\varphi(\delta) = 0,8lA^{-l} \delta^{l-1}. \quad (12)$$

В формуле Розина-Раммлера кривые распределения по данным ситовых анализов могут быть выражены уравнением [6]

$$D(\delta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\delta}{B}\right)^A\right], \quad (13)$$

где A и B — постоянные, легко определяемые в логарифмической форме этого уравнения по опытным данным.

Из уравнения (13) следует, что плотность распределения массы по диаметрам определяется формулой

$$\varphi(\delta) = \frac{A}{\delta} \left(\frac{\delta}{B}\right)^{A-1} \exp\left[-\left(\frac{\delta}{B}\right)^A\right]. \quad (14)$$

При $A < 1$ и $\delta \rightarrow 0$ плотность распределения $\varphi(\delta) \rightarrow \infty$, хотя $D(\delta)$ при $\delta = 0$ остается конечной. Поэтому при $A < 1$ формула (14) не дает правильного описания распределения очень мелких фракций.

Нормальное распределение — это нормальная Гауссова функция, имеющая вид

$$D(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} \exp\left[-\frac{(\delta - \delta_{50})^2}{2\sigma^2}\right] d\delta. \quad (15)$$

где δ_{50} — медиана распределения; σ — среднеквадратическое отклонение диаметров от их среднего значения.

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\delta - \delta_{50})^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma} F(t), \quad (16)$$

где $0 < \delta < \infty$, $F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{t^2}{2})$, t — нормированная величина нормально распределенная, которую можно найти в справочной литературе.

Логарифмически нормальное распределение получается, если в нормальную Гауссову функцию распределения подставить в качестве аргумента не диаметр частиц, а логарифм диаметра.

Функция ЛНР по диаметрам частиц имеет вид:

$$D(\delta) = \frac{1}{\ln(\sigma)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln(\delta)} \exp\left\{-\frac{[\ln(\delta) - \ln(\delta_{50})]^2}{2\ln^2(\sigma)}\right\} d\ln(\delta), \quad (17)$$

где δ_{50} — медиана распределения; $\ln(\sigma)$ — среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta \ln(\sigma)} \exp\left[-\frac{(\ln(\delta) - \ln(\delta_{50}))^2}{2\ln^2(\sigma)}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta \ln(\sigma)} F(t), \quad (18)$$

где $0 < \delta < \infty$.

Если распределение массы частиц по размерам подчиняется логарифмически нормальному закону, то ему же будут подчинены распределения и количества, и удельной поверхности частиц по размерам [6].

1.7 Пример расчета параметров статистических распределений

Оценку параметров, входящих в формулы описания распределения частиц по размерам, можно получить методом наименьших квадратов из кривой $D(\delta)$. Для этого уравнения (11, 13, 15, 17) необходимо представить в линейном виде

$$y = a + bx. \quad (19)$$

Интегральную формулу Годена-Андреева можно привести к линейному виду путем логарифмирования

$$\ln(D(\delta)) = [\ln(0,8) - l\ln(A)] + l\ln(\delta). \quad (20)$$

Производя замену переменных $y = \ln(D(\delta))$, $a = \ln(0,8) - l\ln(A)$, $b = l$, $x = \ln(\delta)$, получаем

$$y = a + bx,$$

При решении последнего уравнения методом наименьших квадратов получаем параметры формулы Годена-Андреева

$$l = b, \quad A = \exp\left(\frac{\ln(0,8) - a}{l}\right). \quad (21)$$

Интегральную формулу Розина-Раммлера можно привести к линейному виду путем двойного логарифмирования

$$\ln(-\ln(1 - D(\delta))) = -A \ln(B) + A \ln(\delta). \quad (22)$$

Производя замену переменных

$$y = \ln(-\ln(1 - D(\delta))), \quad b = A, \quad a = -A \ln(B),$$

уравнение (22) приводим к линейному виду (19).

При решении полученного уравнения методом наименьших квадратов можно получить параметры формулы Розина-Раммлера

$$A = b, \quad B = \exp\left(\frac{-a}{A}\right). \quad (23)$$

Для определения параметров уравнения нормального закона распределения используют линейную зависимость

$$\delta = \delta_{50} + \sigma t. \quad (24)$$

Для определения параметров логарифмически нормального закона распределения используют линейную зависимость

$$\ln(\delta) = \ln(\delta_{50}) + \ln(\sigma)t. \quad (25)$$

Для решения линейных уравнений можно использовать электронные таблицы Microsoft Excel, в которых реализованы следующие функции:

— ОТРЕЗОК(Y1:YN;X1:XN) (для расчета коэффициента a линейного уравнения);

— НАКЛОН(Y1:YN;X1:XN) (для расчета коэффициента b линейного уравнения);

— НОРМСТОБР($D(\delta)$) (для вычисления величины t).

Примеры шаблонов электронных таблиц Excel и расчетов коэффициентов уравнений приведены в табл. 11—16.

Таблица 11 — Шаблон в таблицах Excel для определения параметров формулы Годена-Андреева

	А	В	С	Д	Е	Ф
1	Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	$\ln(\delta)$	$\ln(D(\delta))$
2					х	у
3	4	12	12	=C3/\$B\$11	=LN(A3)	=LN(D3)
4	6	41	53	=C4/\$B\$11	=LN(A4)	=LN(D4)
5	8	46	99	=C5/\$B\$11	=LN(A5)	=LN(D5)
6	10	120	219	=C6/\$B\$11	=LN(A6)	=LN(D6)
7	12	149	368	=C7/\$B\$11	=LN(A7)	=LN(D7)
8	14	102	470	=C8/\$B\$11	=LN(A8)	=LN(D8)
9	16	122	591	=C9/\$B\$11	=LN(A9)	=LN(D9)
10	40	47	638	=C10/\$B\$11	—	—
11	Сумма	638				
12	a=ОТРЕЗОК(F3:F9;E3:E9)			A=EXP((LN(0,8)-B12)/E13)		
13	b=НАКЛОН(F3:F9;E3:E9)			l=B13		

Таблица 12 — Определение параметров формулы Годена-Андреева в таблицах Excel

Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	$\ln(\delta)$	$\ln(D)$
				х	у
4	12	12	0,0188	1,3863	-3,9734
6	41	53	0,0831	1,7918	-2,4880
8	46	99	0,1552	2,0794	-1,8632
10	120	219	0,3433	2,3026	-1,0693
12	149	368	0,5768	2,4849	-0,5503
14	102	470	0,7367	2,6391	-0,3056
16	122	591	0,9263	2,7726	-0,0765
40	47	638	1,0000	—	—
Сумма	638				

$$a=-7,7157$$

$$b=2,8262$$

$$A=14,170$$

$$l=2,826$$

Таблица 13 — Шаблон в таблицах Excel для определение параметров формулы Розина-Раммлера

	A	B	C	D	E	F
1	Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	$\ln(\delta)$	$\ln(-\ln(1-D(\delta)))$
2					x	y
3	4	12	12	=C3/\$B\$11	=LN(A3)	=LN(-LN(1-D3))
4	6	41	53	=C4/\$B\$11	=LN(A4)	=LN(-LN(1-D4))
5	8	46	99	=C5/\$B\$11	=LN(A5)	=LN(-LN(1-D5))
6	10	120	219	=C6/\$B\$11	=LN(A6)	=LN(-LN(1-D6))
7	12	149	368	=C7/\$B\$11	=LN(A7)	=LN(-LN(1-D7))
8	14	102	470	=C8/\$B\$11	=LN(A8)	=LN(-LN(1-D8))
9	16	122	591	=C9/\$B\$11	=LN(A9)	=LN(-LN(1-D9))
10	40	47	638	=C10/\$B\$11	—	—
11	Сумма	638				
12	a=ОТРЕЗОК(F3:F9;E3:E9)			A=B13		
13	b=НАКЛОН(F3:F9;E3:E9)			l=EXP(-B12/E12)		

Таблица 14 — Определение параметров формулы Розина Раммлера в таблицах Excel

Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	$\ln(\delta)$	$\ln(-\ln(1-D(\delta)))$
				x	y
4	12	12	0,0188	1,3863	-3,9734
6	41	53	0,0831	1,7918	-2,4880
8	46	99	0,1552	2,0794	-1,8632
10	120	219	0,3433	2,3026	-1,0693
12	149	368	0,5768	2,4849	-0,5503
14	102	470	0,7367	2,6391	-0,3056
16	122	591	0,9263	2,7726	-0,0765
40	47	638	1,0000	—	—
Сумма	638				

$$a=-8,7943$$

$$A=3,468$$

$$b=3,4678$$

$$B=12,629$$

Таблица 15 — Шаблон в таблицах Excel для определение параметров нормального закона распределения

	A	B	C	D	E
1	Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	t
2	y				x
3	4	12	12	=C3/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D3)
4	6	41	53	=C4/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D4)
5	8	46	99	=C5/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D5)
6	10	120	219	=C6/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D6)
7	12	149	368	=C7/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D7)
8	14	102	470	=C8/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D8)
9	16	122	591	=C9/\$B\$11	=НОРМСТОБР(D9)
10	40	47	638	=C10/\$B\$11	—
11	Сумма	638			
12		δ_{50} =	=ОТРЕЗОК(A3:A9;E3:E9)		
13		σ =	=НАКЛОН(A3:A9;E3:E9)		

Таблица 16 — Определение параметров нормального закона распределения в таблицах Excel

Размер частиц δ , мкм	Количество частиц n	Нарастающий итог	$D(\delta)$	t
				x
4	12	12	0,0188	-2,0790
6	41	53	0,0831	-1,3847
8	46	99	0,1552	-1,0145
10	120	219	0,3433	-0,4036
12	149	368	0,5768	0,1937
14	102	470	0,7367	0,6331
16	122	591	0,9263	1,4490
40	47	638	1,0000	—
Сумма	638			

$$\delta_{50} = 11,3095$$

$$\sigma = 3,5175$$

Один из методов расчета параметров логарифмически нормального распределения приведен в ГОСТ 11.009-79 [2]. Он применим для обработки данных микроскопического анализа и не требует обязательного предварительного фракционирования результатов анализа.

Расчет параметров распределения числа частиц порошка по размерам производится по формулам:

$$\lg(\delta_{50}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(\delta_i), \quad (26)$$

$$\lg(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg(\delta_i) - \lg(\delta_{50}))^2}. \quad (27)$$

Пример расчета параметров ЛНР по размерам порошка аморфного бора приведен в таблице 17.

Таблица 17 — Расчет параметров ЛНР по размерам порошка аморфного бора по ГОСТ 11.009-79

Границы фракции, мкм		Количество частиц n_i	Середина ин- тервала δ_i , мкм	$\lg(\delta_i)$	$n_i \times \lg(\delta_i)$	$n_i \times (\lg(\delta_i) - \lg(\delta_{50}))^2$
δ_{\min}	δ_{\max}					
0,5	0,9	91	0,70	-0,1549	-14,096	7,3145
0,9	1,1	258	1,00	0,0000	0,000	4,2675
1,1	1,3	468	1,20	0,0792	37,057	1,1435
1,3	1,5	351	1,40	0,1461	51,291	0,1077
1,5	1,7	166	1,60	0,2041	33,884	0,9465
1,7	1,9	142	1,80	0,2553	36,249	2,2781
1,9	2,1	105	2,00	0,3010	31,608	3,1215
2,1	2,3	59	2,20	0,3424	20,203	2,6972
2,3	2,5	25	2,40	0,3802	9,505	1,5826
2,5	2,7	15	2,60	0,4150	6,225	1,2301
2,7	2,9	13	2,80	0,4472	5,813	1,3191
Сумма		1693		2,4156	217,738	26,0083

$$\lg(\delta_{50}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(\delta_i) = 0,1286;$$

$$\lg(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg(\delta_i) - \lg(\delta_{50}))^2} = 0,1240$$

2 МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 Подготовка проб порошков

Пробу исследуемого порошка после тщательного перемешивания помещают в виде монослоя на предметное стекло. Для исключения агрегирования частиц и их слипания допускается легкое механическое растирание или жидкое диспергирование с использованием поверхностно-активных веществ, подбираемых индивидуально для различных порошков [1].

Примером диспергирующей жидкости может служить вода, содержащая 1—2% поверхностно-активных веществ, а также глицерин по ГОСТ 6259—75, парафиновое масло, иммерсионное (кедровое) масло по ГОСТ 13739—78. Для закрепления частиц возможно применение пленкообразующего быстросохнущего 4% раствора коллодия в амилацетате.

Из пробы для испытаний готовят два препарата и сравнивают их под микроскопом. Если они совпадают, то измерение проводят на одном из них. Считают, что приготовленные микроскопические препараты совпадают, если в поле зрения, ограниченном полем основного прямоугольника или круга, находится:

— от 6 до 30 частиц при непосредственном визуальном наблюдении микроскопического изображения;

— не более 150 частиц при автоматическом измерении по микроскопическому изображению. При этом расстояние между частицами должно быть не меньше размера большей из соседствующих между собой частиц.

При несоблюдении этих условий приготовление микроскопического препарата повторяют.

2.2 Рекомендации по выбору увеличения микроскопа и измерению размеров частиц

Размеры частиц измеряют при непрерывном передвижении препарата или при наблюдении отдельных полей зрения. Отдельные поля зрения выбирают на пробе исследуемого порошка, перемещая его на величину, большую диагонали прямоугольника

или диаметра круга, ограничивающего поле зрения. Площадь, на которой проводят измерения и счет частиц, равна: при непрерывном передвижении препарата — длине линейки окуляра, умноженной на длину пути, пройденного препаратом от начала до конца процедуры измерения; при наблюдении отдельных полей зрения — сумме их площадей.

Частицу считают принадлежащей к рассматриваемому полю, если она находится на одной из половинок границ поля. Например, в случае прямоугольника учитывают частицы, находящиеся внутри его, на левой вертикальной и верхней горизонтальной сторонах, на пересечении этих сторон и на другом конце одной из них. Частицы, находящиеся на остальных сторонах и в углах, не учитывают. В случае круга учитывают все частицы, находящиеся внутри его, а также все частицы, находящиеся на одной полуокружности и на одном конце проведенного диаметра (рис. 6 *а, б*).

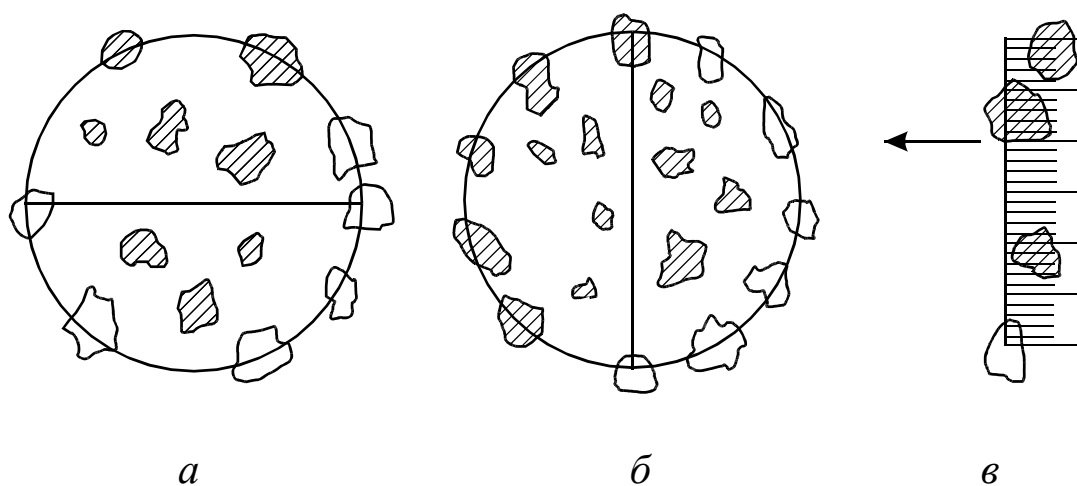


Рисунок 6 — К измерению размеров частиц: *а, б* — в отдельных полях зрения; *в* — при непрерывном перемещении

При непрерывном передвижении микроскопического препарата измерительной линейкой служит вертикальная сторона прямоугольника или вертикальная линия микрометрической шкалы окуляра. Учитывают частицы, центры которых проходят через длину линейки, не пропуская ни одной. Не учитывают те частицы, центры которых проходят вне линейки, хотя частично они могут проходить через концевые точки линейки (рис. 6 *в*).

Измерение частиц на отдельных полях зрения производят с помощью линейки на матовом стекле, на экране проектора или на микроскопических снимках. Линейку перед применением следует

откалибровать с помощью объект-микрометра. Измеряют максимальную хорду частиц в горизонтальном или вертикальном направлениях.

Если порошок содержит частицы в большом интервале размеров и это из-за недостаточной глубины резкости объектива микроскопа не позволяет получать резкое изображение одновременно всех частиц, то малые и большие частицы наблюдают и измеряют при разных увеличениях.

Все измерения проводят при трех (двух, одном) увеличениях. При малом увеличении учитывают только большие частицы, при большом увеличении — только малые частицы.

Результаты измерений при разных увеличениях пересчитывают, определяя расчетное количество частиц. Под расчетным количеством частиц понимают количество частиц, отнесенное к одному выбранному увеличению и рассчитанное по формуле (для трех увеличений)

$$N_{pac} = \sum_{i=1}^{l_{\delta}} N_{\delta i} + \sum_{i=1}^{l_{cp}} N_{cp i} \left(\frac{F_{cp}}{F_{\delta}} \right)^2 + \sum_{i=1}^{l_m} N_{mi} \left(\frac{F_m}{F_{\delta}} \right)^2, \quad (28)$$

где $N_{\delta i}$ — количество частиц i -го класса, измеренных при большем увеличении;

$N_{cp i}$ — количество частиц i -го класса, измеренных при среднем увеличении;

N_{mi} — количество частиц i -го класса, измеренных при малом увеличении;

F_{δ} — большое увеличение;

F_{cp} — среднее увеличение;

F_m — малое увеличение.

Число полей зрения, просмотренных при разных увеличениях, должно быть одинаковым. Если измерения частиц проводят при непрерывном передвижении препарата, то при разных увеличениях должны быть просмотрены одинаковые площади исследуемой пробы порошка.

Количество измеренных частиц (при использовании одного увеличения) или расчетное количество измеренных частиц (при использовании двух или трех увеличений) должно быть не менее 625.

2.3 Последовательность выполнения работы

Работу следует производить в следующем порядке.

1. Подготовить пробу порошка (см. п. 2.1).
2. Настроить резкость микроскопа.
3. Произвести определение разметов частиц (не менее 100 при ручном счете) в соответствии рекомендациями п. 2.2.
4. Сгруппировать данные и произвести статистические расчеты.

Группировка данных осуществляется в следующем порядке:

- 4.1. Определяется максимальный и минимальный размер (δ_{min}) измеренных (δ_{max}) частиц.
- 4.2. Рассчитывается ширина столбцов гистограммы

$$h = (\delta_{max} - \delta_{min})/N,$$

где N — число столбцов гистограммы (обычно при ручном счете $N = 10$).

- 4.3. Рассчитываются границы интервалов гистограммы

$$\delta_{i+1} = \delta_i + h.$$

4.4. Данные группируются следующим образом: если размер частицы попадает в интервал гистограммы ($\delta_i > \delta \geq \delta_{i+1}$), то число частиц в этом интервале увеличивается на 1 ($N(\delta_i) = N(\delta_i) + 1$).

5. Оформить отчет о лабораторной работе.

2.4 Составление отчета о лабораторной работе

Отчет о лабораторной работе должен содержать следующие пункты.

1. Задание на лабораторную работу.
2. Описание установки.
3. Таблицу сгруппированных данных дисперсного состава порошка.
4. Результаты статистических расчетов.
5. Гистограммы и графики интегральной и дифференциальной кривых распределения частиц по размерам.

Пункты 4 и 5 выполняются по заданию преподавателя методами, описанными в пунктах 1.4, 1.5, 1.6 и 1.7.

2.5 Пример отчета о лабораторной работе

Задание: определить дисперсный состав порошка марки: ПА-4.

Здесь следует привести описание установки, описание метода определения дисперсного состава, подробные расчеты методом, указанным преподавателем.

Результаты статистических расчетов:

Параметры распределения по формуле Годена

$$l=0,608$$

$$a=112,000 \text{ мкм}$$

Интегральная оценка погрешности $Q=0,243$

Параметры распределения по формуле Розина-Раммлера

$$a=1,440$$

$$b=56,300 \text{ мкм}$$

Интегральная оценка погрешности $Q=0,017$

Параметры распределения по логарифмически нормальному закону

$$\sigma=1,850$$

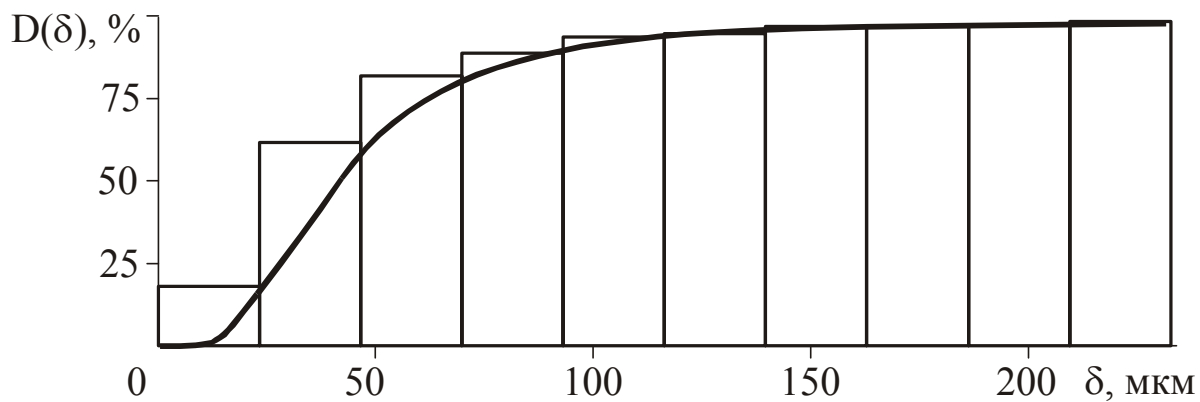
$$\delta_{50}=40,800 \text{ мкм}$$

Интегральная оценка погрешности $Q=0,002$

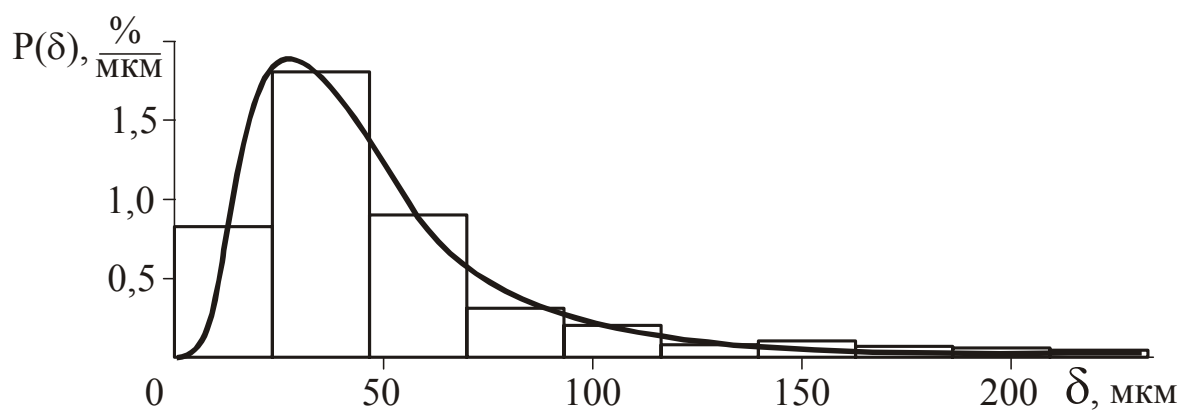
Данные описываются логарифмически нормальным законом

Дисперсный состав порошка марки ПА-4

Номер интервала	Границы интервала, мкм	Число частиц
1	0 — 23.4	40
2	23.4 — 46.8	88
3	46.8 — 70.2	43
4	70.2 — 93.6	15
5	93.6 — 117	10
6	117 — 140	3
7	140 — 164	5
8	164 — 187	2
9	187 — 234	7



Интегральная кривая распределения порошка по размерам



Дифференциальная кривая распределения порошка по размерам

3 ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА

3.1 Описание установки

Схема установки для автоматического определения дисперсного состава порошков показана на рис. 7.

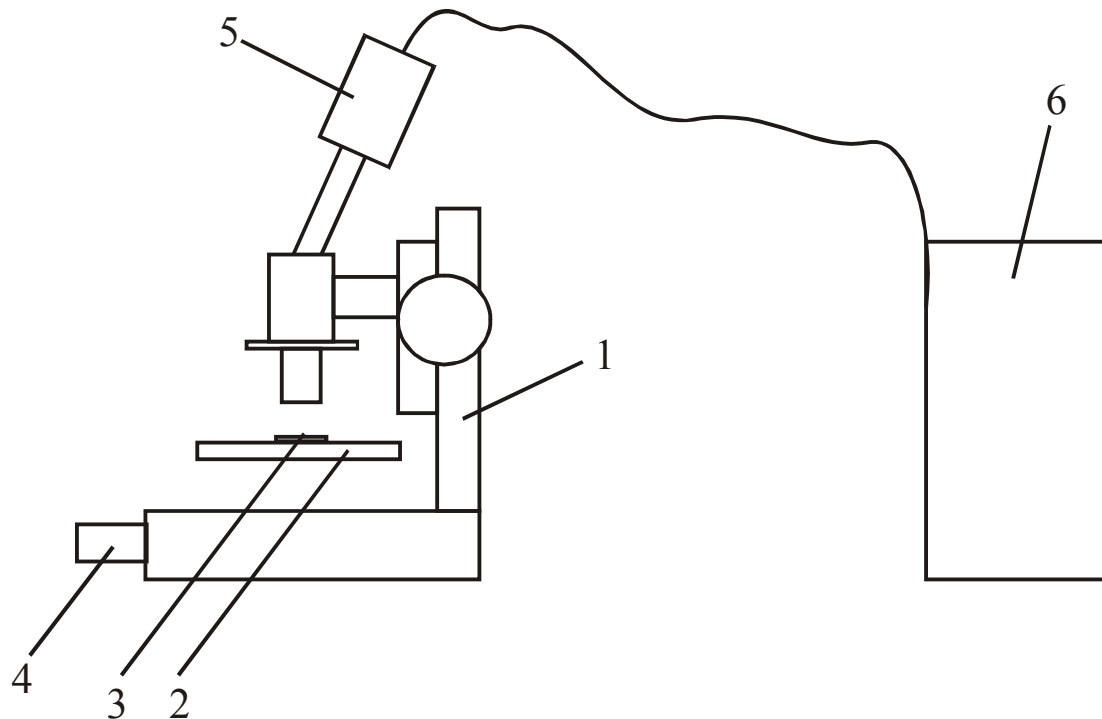


Рисунок 7 — Схема установка для автоматизированного определения дисперсного состава порошков: 1— микроскоп; 2— предметный столик; 3— предметное стекло с исследуемой пробой; 4— осветитель; 5— видеокамера; 6— компьютер

Изображение через объектив микроскопа попадает в видеокамеру, где преобразуется в цифровой видеосигнал. Этот сигнал поступает в компьютер и преобразуется в растровое изображение. Получение и дальнейшая обработка графического изображения осуществляется с помощью программы Little 2 (см. прил.).

Обработка данных о размерах частиц проводится либо вручную, либо при помощи программы Little 2.

3.2 Последовательность выполнения работы

Работа осуществляется в следующем порядке.

1. Подготавливается проба порошка (см. п. 2.1).
2. Настраивается резкость микроскопа.
3. Запускается программа Little 2.
4. Производится калибровка (см. прил.).
5. Производится настройка яркости изображения.
6. Производится фильтрация изображения.
7. Производится обработка краев изображения.
8. Производится съемка и обработка нескольких кадров (см. п. 2.2).
9. Если обработка изображений в автоматическом режиме не дает результатов — измерения производятся в режиме «ручные измерения» (см. п. 2.2).
10. Группируются данные и производятся статистические расчеты вручную, либо при помощи программы Little 2.
11. Оформляется отчет о лабораторной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23402-78. Порошки металлические. Определение размеров частиц. — М.: Изд-во стандартов, 1986.— 14 с.
2. ГОСТ 11.009-79. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров логарифмически нормального распределения. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 29 с.
3. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др.— М.: Металлургия, 1987.— 792 с.
4. Мизонов В. Е., Ушаков С. Г. Аэродинамическая классификация порошков.— М.: Химия, 1989.— 160 с.
5. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ.— М.: Мир, 1987.— 280 с.
6. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов.— Л.: Химия, 1987.— 264 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ). ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ LITTLE 2

Для запуска программы необходимо осуществить последовательность операций, перечисленных ниже (рис. 1).

1. Нажать кнопку «Пуск» на главной панели Windows.
2. Выбрать пункт «Программы».
3. В раскрывшемся списке выбрать папку «Little 2».
4. В раскрывшемся списке выбрать программу «Little 2».
5. Можно запустить программу при помощи ярлыка на рабочем столе.

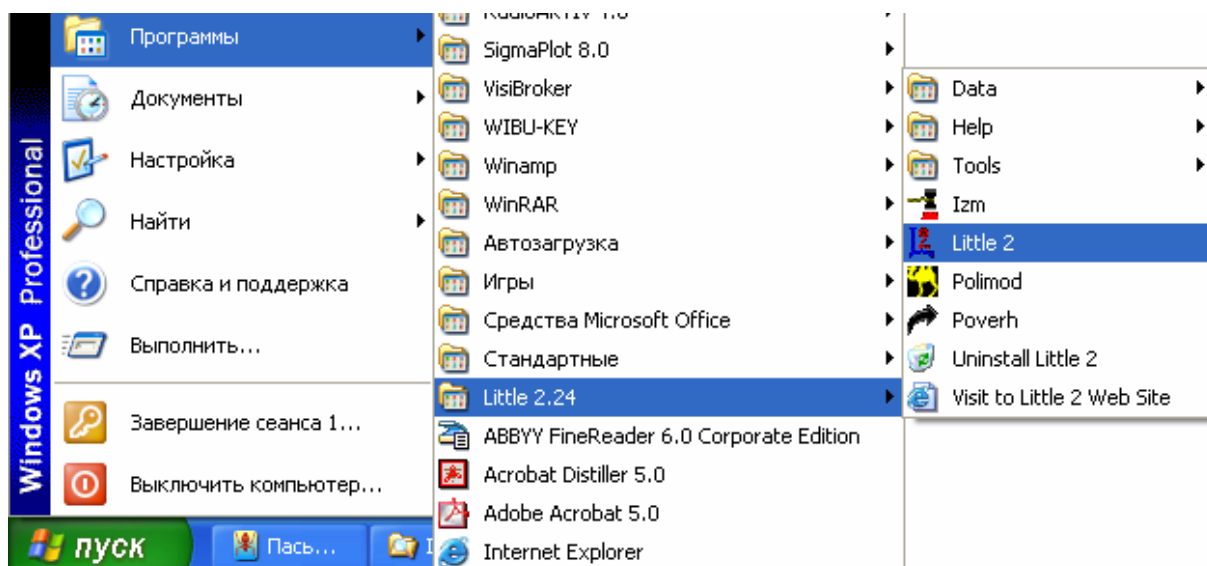


Рисунок 1 — Запуск программы Little 2

Для получения изображения с видеокамеры необходимо выбрать пункт «Получить» из меню «Файл» (рис. 2).

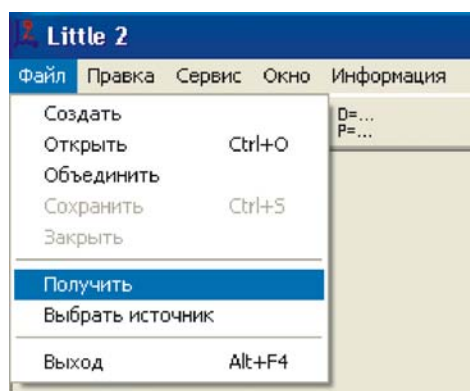


Рисунок 2 — Получение изображения с видеокамеры

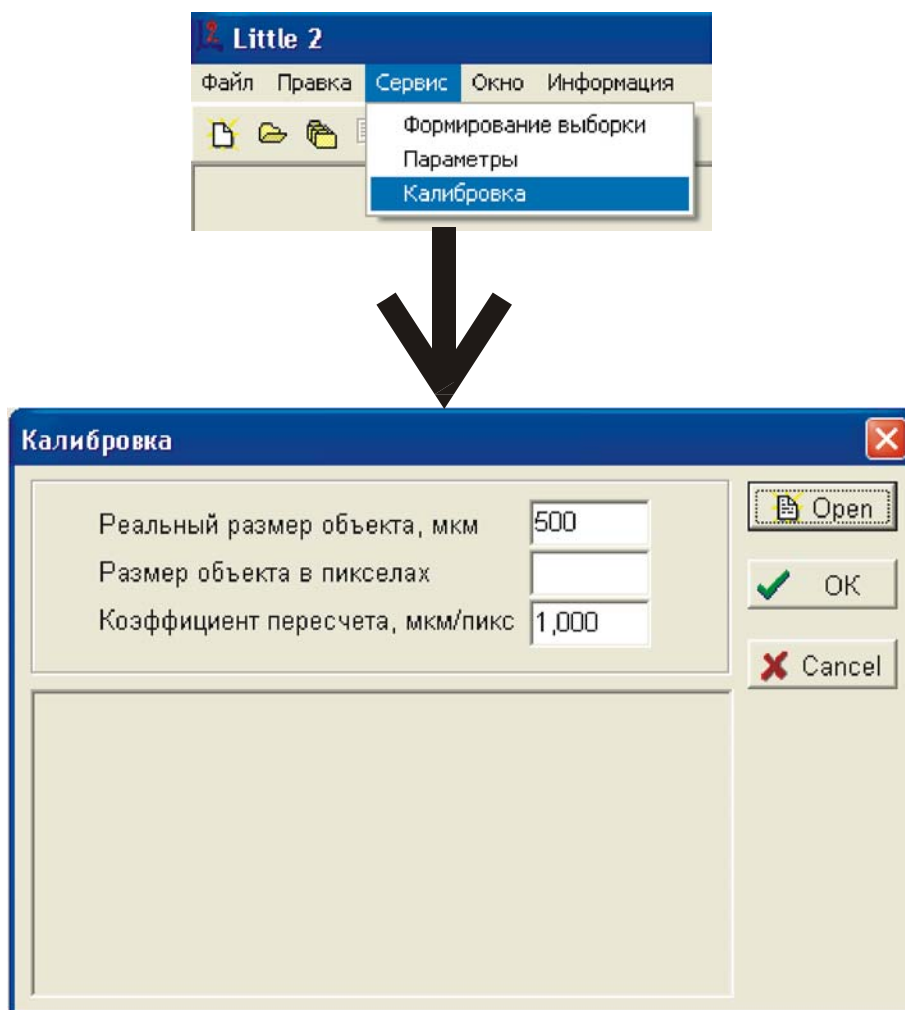


Рисунок 3 — Калибровка

Для проведения калибровки необходимо осуществить последовательность операций (рис. 3).

1. Выбрать команду «Калибровка» из меню «Сервис».
2. В появившемся окне установить необходимый коэффициент пересчета (табл. 1).
3. Нажать на кнопку «ОК».

Таблица 1 — Калибровочные коэффициенты

Увеличение микроскопа	Калибровочный коэффициент мкм/пикс	Увеличение микроскопа	Калибровочный коэффициент мкм/пикс
X1	19,6	X7	2,62
X2	9,35		
X4	4,61		

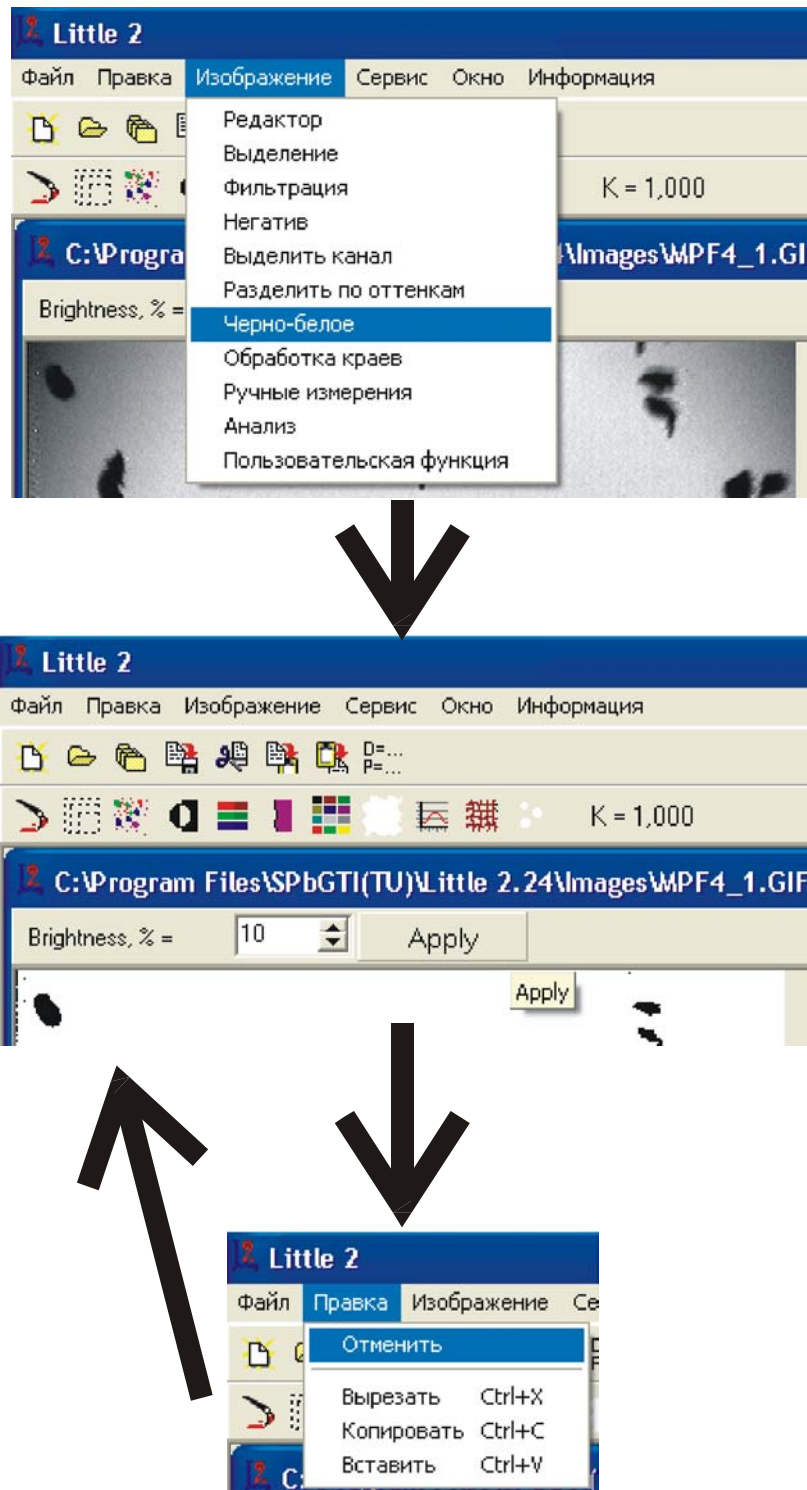


Рисунок 4 — Подбор яркости изображения

Подбор яркости изображения производится по следующей схеме.

1. Вызвать панель преобразования при помощи команды «Черно-белое» из меню «Изображение» (рис. 4).
2. Нажав на кнопку «Apply» преобразовать изображение в черно-белое.

3. Если яркость изображения после преобразования в черно-белое не устраивает (не получается контуров отдельных частиц, затемнение, засвечивание), то для возврата к исходному изображению выбрать команду «Отменить» из меню «Правка».

4. Увеличить или уменьшить уровень яркости в зависимости от желаемого эффекта (Параметр «Brightness»).

5. Повторять операцию до получения четкого изображения.

Для удаления «грязи», пыли и мелких нежелательных деталей изображения необходимо провести фильтрацию изображения (рис. 5). Для этого необходимо вызвать панель фильтрации путем выбора пункта «Фильтрация» из меню «Изображение». Установить параметры X и Y (чем они больше, тем больше эффект, рекомендуется значение 5) и нажать на кнопку «Apply».

Для удаления объектов, целиком не попавших в поле зрения, необходимо провести обработку краев изображения. Для этого необходимо воспользоваться одноименным пунктом меню «Изображение».

Для определения размеров частиц (других объектов) необходимо воспользоваться пунктом «Анализ» меню «Изображение».

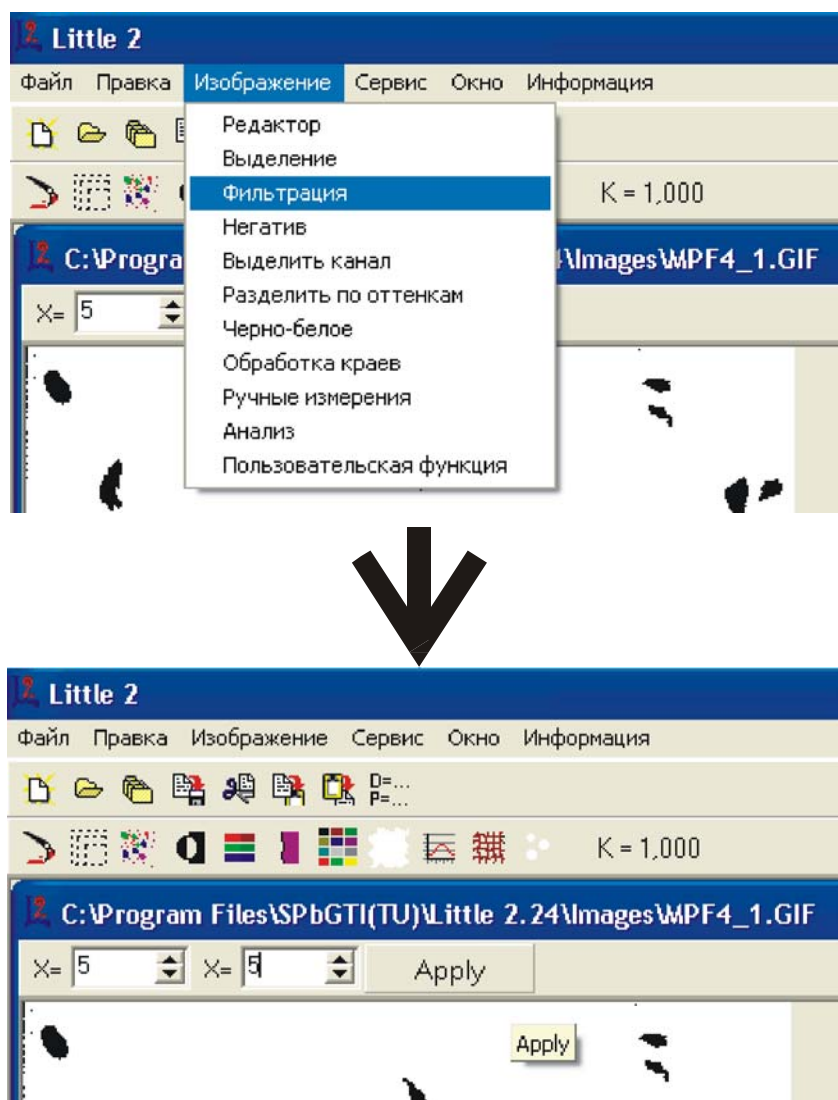


Рисунок 5 — Фильтрация изображения

Для проведения серии экспериментов можно провести описанные выше действия один раз, а затем, подобрав параметры, пользоваться пунктом «Комплексный анализ» меню «Изображение» для автоматического выполнения всей цепочки действий (рис. 4).

Ручные измерения производятся при выборе пункта «Ручные измерения» меню «Изображение».

По окончании автоматической обработки изображения на экране появляется окно, содержащее данные о линейном размере каждой частицы.

Для группировки данных необходимо выполнить последовательность действий (рис. 6).

1. Выбрать пункт «Группировка данных» из меню «Статистика».

2. В появившемся окне установить необходимое число интервалов гистограммы.
3. Нажать на кнопку «ОК».

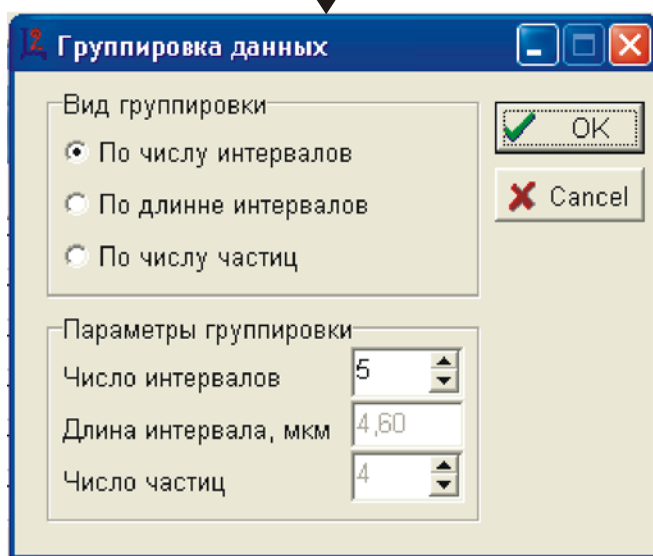
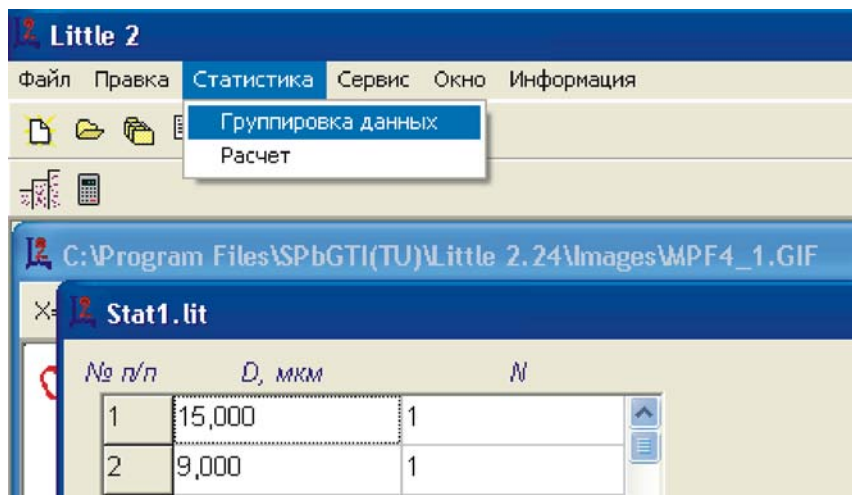


Рисунок 6 — Группировка данных

Для проведения статистических расчетов выбирается пункт «Расчет» из меню «Статистика» (рис. 6).

Кафедра коллоидной химии
Кафедра высокоэнергетических процессов
Методические указания к лабораторной работе
Определение дисперсного состава порошков микроскопическим методом

Дмитрий Владимирович Королев
Владимир Николаевич Наумов
Константин Александрович Суворов

Отпечатано с оригинал-макета. Формат 60×90.¹/₁₆
Печ. л. 2,65. Тираж 50 экз. Заказ №

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

198003, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 26