

Авторефер.

Н-42

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Аспирант НЕДРАНЕЦ Владимир Сергеевич

**„ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА
АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ
ДИСПЕРСНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ“**

Специальность 05.13.07—Автоматическое управление
технологическими процессами в пищевой промышленности

Диссертация на русском языке

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Переучет 1987

ОДЕССА — 1975

№ 42
H 42

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

Одесский технологический институт пищевой промышленности
им. М. В. Ломоносова

На правах рукописи

Аспирант НЕДРАНЕЦ Владимир Сергеевич

"ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА
АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ"

Специальность 05.13.07 - Автоматическое управление
технологическими процессами в пищевой промышленности

Диссертация на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса 1975

№ 012474

ОНАХТ 21.06.12
Исследование и разра



v012474

Автор: v 012474
Н.И. Недранец В.С.
Иссл. и разра фотоэл.
1975 5/14

42

Работа выполнена на кафедре технологии приборостроения
Одесского технологического института пищевой промышленности
им. М.В.Ломоносова.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Наремский Н.К.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Мяздриков О.А.
– кандидат технических наук,
доцент Худолей Л.Л.

Ведущее предприятие – Всесоюзное научно-производственное объединение "Пищепромавтоматика".

Автореферат разослан "16" января 1975 г.

Защита диссертации состоится 21 февраля 1975 г. в 10 часов
на заседании Совета по присуждению ученых степеней факультета
автоматизации и приборостроения Одесского технологического института
пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова (ауд. 272).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять по адресу: 270039, г.Одесса-39, Свердлова 112,
ОТИПИ им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
ОТИПИ им.М.В.Ломоносова
К.Т.Н.

/Запорожец Л.А./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Значительный рост производства и применения сыпучих материалов в пищевой, химической и многих других отраслях народного хозяйства вызывает необходимость дальнейшего исследования и совершенствования техники и аппаратуры автоматического измерения дисперсности сыпучих материалов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в исследовании и разработке метода и средств автоматического измерения дисперсности сыпучих материалов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы состоит в том, что в ней по-новому рассмотрены такие вопросы теории гранулометрии, как определение оптимального объема счетной выборки, метод построения гистограмм, способ определения параметров законов распределений, разработана теория статистической квазиэллипсоидности частиц, исследован измерительный преобразователь, в основу которого положен фотоэлектрический метод сканирования частиц, подающихся в зону измерения с помощью разработанного электростатического дозатора.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ заключается в том, что разработана и изготовлена автоматическая система измерения дисперсности сыпучих материалов в диапазоне размеров частиц от единиц до сотен микрон.

РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Результаты научных исследований и разработок нашли практическое применение путем внедрения разработанной автоматической системы измерения дисперсности сыпучих материалов (на заводе ВНИИ источников тока г.Москвы), а также совместных испытаний разработанной аппаратуры на Одесском комбинате пищевых концентратов.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ. Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографического указателя, в котором приводится 135 источников и приложения на 4 страницах. Объем диссертации составляет 162 страницы машинописного текста и 41 рисунок.

Поставленные в настоящее время перед промышленностью задачи об увеличении объема производства сыпучих материалов и расширении области их применения выдвигает первоочередную проблему автоматического контроля качества дисперсных сред. Применение устройств для автоматического измерения дисперсности сыпучих материалов обеспечивает рост производительности труда, повышение качества выпускаемой продукции, снижение процента брака, что дает возможность достигнуть значительной экономии энергетических затрат на весь технологический цикл измельчения, создает условия для комплексной автоматизации процессов производства.

Таким образом, анализ гранулометрического состава дисперсных материалов является широкой и актуальной задачей, чем и объясняется то внимание, которое ему уделяется как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе.

Однако, проблему анализа гранулометрического состава дисперсных материалов нельзя считать решенной. Так, требования сегодняшнего дня сдвинули граничный размер надежно регистрируемой частицы с 20 микрон до единиц и даже десятых долей микрона. Кроме того, если относительно недавно технику удовлетворяли методы гранулометрии, дающие информацию о средневзвешенных характеристиках сыпучих материалов (интегральные методы), то расширение круга задач гранулометрии требует разработки новых методов, дающих информацию о составе анализируемой пробы на основании совокупности данных по каждой из частиц (дифференциальные методы). Одним из основных руководящих соображений при разработке новых методов должно быть требование возможности проведения измерения дисперсности сыпучих материалов без каких-либо специальных операций, требующих значительных затрат времени на подготовку пробы к анализу. Очевидно, что такой подход, при прочих равных условиях, позволяет рассматривать соответствующие методы как приближающиеся к экспресс-методам и допускает их последующее использование для цели автоматиза-

ции технологических процессов. Отсюда вполне понятна важность теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку указанных методов, на базе которых можно создать автоматические системы для измерения и анализа гранулометрического состава дисперсных сред.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена анализу существующей методики исследования гранулометрического состава сыпучих материалов. Основным вопросом данной методики является выбор метода измерения дисперсности порошков. При этом следует отдавать предпочтение методу, на базе которого может быть создана автоматическая система, решающая широкий круг задач современной гранулометрии и позволяющая анализировать с достаточной точностью широкий круг порошков с большим размахом размеров частиц без переналадки системы и без предварительных операций по подготовке пробы к анализу; перерабатывать информацию в вид, удобный для использования в научных исследованиях, в АСУТП и т.д.

Проблема выбора метода измерения дисперсности сыпучих материалов для решения конкретной задачи ясна из того, что в настоящее время известно более ста различных методов и их модификаций. Для облегчения выбора метода гранулометрии в работе принята классификация, основанная на:

- а) способе получения информации (т.е. дифференциальный либо интегральный рассматриваемый метод);
- б) физической сущности метода;
- в) области размеров частиц, в которой применим метод.

Очевидно, ни один из методов гранулометрии не является универсальным, — каждый метод применим для решения конкретной задачи. Вопрос о пригодности того либо другого метода можно решить лишь после исследования принципов, лежащих в основе этого метода, а также сопоставления принятого в данной работе следующего комплекса харак-

теристик: чувствительность метода, точность, быстродействие, способ получения информации, экономические условия и т.д. Пользуясь принятыми классификацией и комплексом характеристик методов гранулометрии был произведен обзор с целью выбора метода, на основе которого возможно создание автоматической системы анализа гранулометрического состава, удовлетворяющей поставленным выше условиям. Проведенный обзор позволяет утверждать, что для выполнения этих требований наиболее подходят фотоэлектрические сканирующие методы. Однако, стадия приготовления пробы, присущая данным методам и являющаяся продолжительным, сложным и еще мало изученным процессом, ставит под сомнение целесообразность применения данного метода в автоматической системе для измерения и анализа гранулометрического состава. Отсюда вытекает необходимость создания автоматического устройства, подающего частицы в зону измерения, и, таким образом, исключаящего стадию приготовления препарата для анализа. При выполнении условия подачи частиц в зону измерения "по одной" целесообразно использовать фотоэлектрический метод сканирования щелью. Это позволяет получить новую модификацию фотоэлектрических методов сканирования частиц в потоке, которая может быть положена в основу создания автоматической системы анализа гранулометрического состава.

Разработка новых дифференциальных методов гранулометрии заставляет по-новому подойти к некоторым положениям теории гранулометрического анализа. Это относится, например, к вопросу о представительности пробы, который различными исследователями решается по-разному. Так, недостатком эмпирического подхода является малочисленность данных для обобщений. В существующих теоретических подходах получены завышенные величины объема счетной выборки, заведомо превосходящие оптимальную. Следовательно, разработка автоматической системы для измерения и анализа гранулометрического состава ставит задачу определения оптимального объема счетной выборки, так как от этого зависит точность измерения гранулометрического сос-

тава, длительность анализа.

Важным этапом гранулометрического анализа является изучение морфологических критериев частиц, среди которых основным является "диаметр". Однако термин "диаметр" частицы, как это следует из проведенного в работе анализа литературных данных, страдает крайней неопределенностью. Вызвано это не только соображениями формально-лингвистического порядка, но и особенностью дисперсных сред, для которых, в зависимости от условий их получения или применения, тот либо иной размер частицы становится определяющим. В дальнейшем под определяющим признаком (размером) частицы будем понимать меру, выбранную в зависимости от целей исследования и возможностей метода. Определяющим признаком в сканирующих фотоэлектрических методах является площадь проекции частицы, т.к. она позволяет получить более полную информацию о частице, чем любой другой ее геометрический размер. Кроме того, тесная (функциональная либо корреляционная) связь между объемом и поверхностью частицы с площадью ее проекции указывает на то, что данный определяющий признак частицы может удовлетворить широкий круг исследований.

Полученные данные об определяющих признаках частиц необходимо математически обработать с целью получения распределения, представляющего собой наиболее полную характеристику сыпучего материала.

Для разделения размеров частиц по классам необходимо решить вопрос о выборе числа классов и их ширины. В настоящее время не существует четких рекомендаций по данным вопросам, которые особенно остро встают при проектировании автоматической системы для измерения и анализа гранулометрического состава с многоканальными амплитудными анализаторами в качестве выходного звена.

Кроме того, многообразие существующих законов распределения создает значительные трудности при выборе гипотезы о законе распределения числа частиц по размерам. Это вызвано тем, что одну и ту

же кривую исследователь может описать различными законами. Причем, найденные законы весьма приблизительно описывают экспериментальную кривую. Процесс отыскания закона распределения является весьма трудоемким. Это ставит первоочередную задачу автоматизации данного процесса для включения его в автоматическую систему измерения и анализа гранулометрического состава дисперсных сред.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ сделана попытка по-новому подойти к некоторым вопросам теории гранулометрического анализа с целью автоматизации этого процесса. Одним из таких вопросов является вопрос об оптимальном объеме счетной выборки (n), необходимой для проведения анализа. Для решения этой задачи нами был использован аналитический подход, позволяющий определить оптимальный объем счетной выборки, удовлетворяющий заданную точность и надежность воспроизведения закона распределения. При этом, чтобы не выдвигались какие-либо гипотезы о виде функции распределения, что весьма важно при исследовании широкого класса порошков, вид функций распределений которых неизвестен экспериментатору, была применена теорема Колмогорова о погрешности эмпирической функции распределения. В работе было получено следующее выражение:

$$n = \left(\frac{x}{\epsilon} \right)^2 \quad K(x) = 1 - R \quad (1)$$

где x - корень уравнения

$K(x)$ - табулированное распределение Колмогорова;

ϵ - абсолютная погрешность функции распределения;

R - надежность.

Согласно этой формуле была построена номограмма оптимального объема счетной выборки (рис.1).

Анализируя данную номограмму, можно сделать вывод, что достижение достоверно высокой точности воспроизведения закона распределения возможно при значительном объеме счетной выборки. Очевидно,

что данное требование могут обеспечить только лишь автоматические системы для анализа гранулометрического состава сыпучих сред.

Нами предпринята попытка решить вопрос о методе построения гистограмм (квантования размаха совокупности частиц) в предположении постоянства относительной погрешности измерения определяющего признака частиц. Наличие этой погрешности приводит к погрешности в определении числа частиц в различных классах гистограммы. Поэтому основным требованием, предъявляемым к методу построения гистограммы, является требование минимума погрешности частот в классах. Указанное требование совместно с требованием равенства во всех классах относительной погрешности частот приводит к разбиению размаха совокупности частиц по закону геометрической прогрессии, знаменатель которой учитывает вид функции распределения. В случае описания закона распределения трехпараметрической формулой вида:

$$\psi(\xi) = A \xi^b e^{-c\xi^s} \quad (2)$$

где ξ - определяющий признак частицы;

b, c, s - параметры формулы;

A - нормирующий множитель,

получено следующее выражение для знаменателя прогрессии разбиения:

$$\xi_k = \frac{\frac{\delta_k}{1-\delta_k} + 3\delta_n}{3\delta_n - \delta_k} \xi_{k-1} \quad (3)$$

где: δ_n - погрешность определения числа в каждом классе гистограмм;

δ_k - погрешность измерения определяющего признака частицы;

ξ_k, ξ_{k-1} - границы классов.

Многообразие существующих законов распределения, как указано выше, создает значительные трудности при аналитическом описании кривых распределения частиц по размерам. Этого можно избежать, если объединить теоретические законы распределения по группам, в которых все плотности вероятностей аппроксимируются функци-

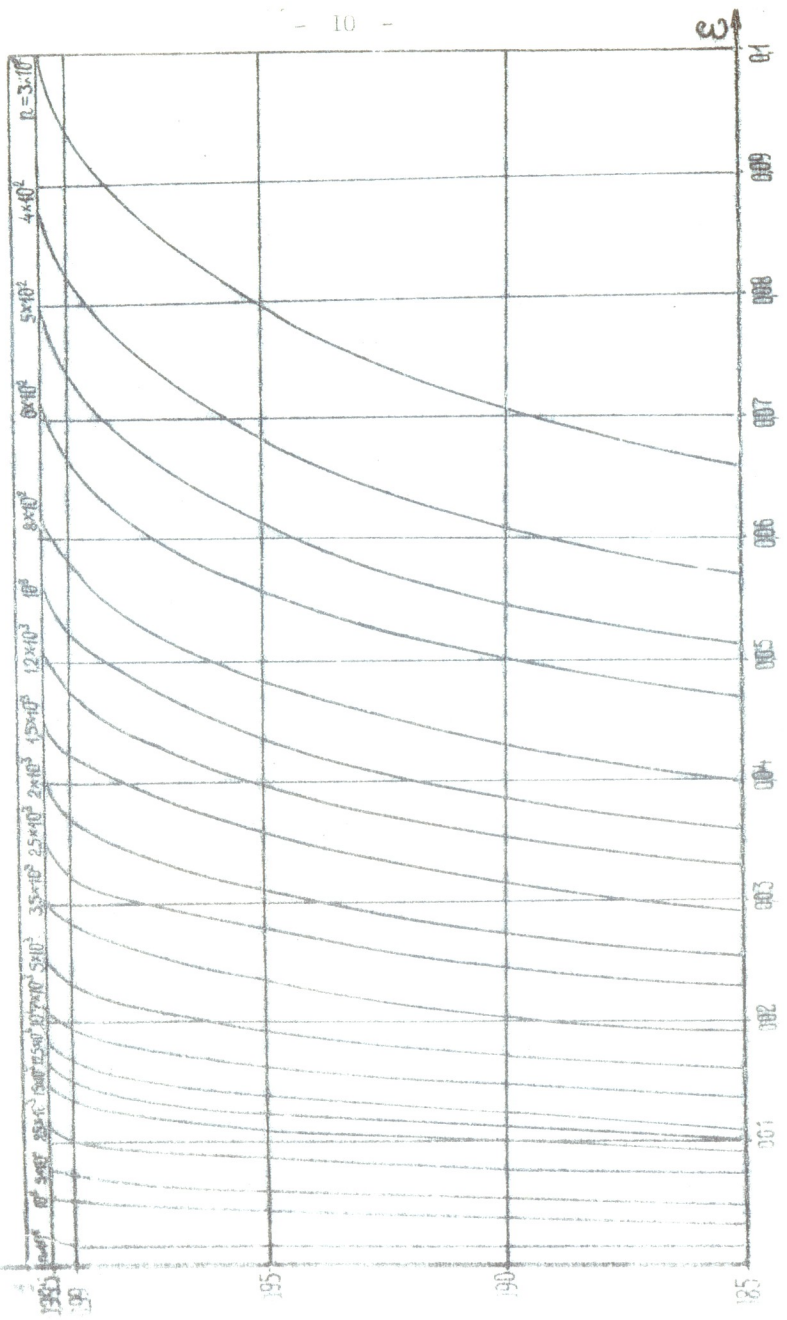


Рис. 1. Номограмма определения объёма счётной выборки

ей одного вида. Проведенный в работе обзор формул, применяемых для описания одномодальных кривых распределений широкого класса порошков позволяет заметить, что с помощью универсальной трехпараметрической формулы вида (2) можно выразить все применяемые в гранулометрии законы за исключением нормально-логарифмического. Следует говорить о возможности аппроксимации нормально-логарифмического закона трехпараметрической формулой с точностью до совпадения первых трех моментов, имеющих реальный физический смысл при анализе гранулометрического состава. Такая постановка вопроса, очевидно, вытекает из того, что различие между двумя законами распределения уменьшается с увеличением количества первых совпавших моментов. В работе приведено условие, которому должны удовлетворять параметры трехпараметрической формулы, чтобы ее можно было заменить нормально-логарифмическим законом в указанном выше смысле.

Универсальность 3-х параметрической формулы вида (2) делает целесообразным ее применение для описания распределений. Однако, вычисление параметров формулы (2) довольно затруднительно, требует применения специальных таблиц неполных Γ -функций, длительных расчетов. Предлагаемые рядом авторов таблицы для определения параметров трехпараметрической формулы сложны в пользовании. Нами разработаны следующие способы определения параметров трехпараметрической формулы, позволяющие значительно упростить этот процесс:

- а) отыскание параметров универсальной формулы с помощью специально разработанных номограмм;
- б) отыскание параметров универсальной формулы с помощью разработанной для ЭЦВМ программы, что дает возможность полностью автоматизировать процесс получения информации, поступающей с автоматической системы анализа гранулометрического состава сыпучих сред.

Графоаналитический метод определения параметров универсаль-

ной формулы вида (2) с помощью разработанной нами номограммы (рис. 2) предполагает, что полученная в результате эксперимента гистограмма имеет односдвальный характер, а частоты классов $(0; \xi_{min.})$ и $(\xi_{max.}, \infty)$ практически равны нулю. Значения неизвестных параметров определяются методом моментов. Для этого решается система уравнений:

$$\int_0^{\infty} \xi^k \varphi(\xi) d\xi = \bar{M}_k \quad (k=0; 1; 2; 3) \quad (4)$$

где \bar{M}_k — эмпирические начальные моменты k-го порядка.

После преобразования система (4) принимает вид:

$$\frac{A}{b+k+1} \Gamma\left(\frac{b+k+1}{s}\right) = \bar{M}_k \quad (5)$$

где $\Gamma(z)$ — гамма-функция.

Исключение из (5) A и C приводит к системе уравнений, описывающих два семейства трансцендентных кривых:

$$\begin{cases} \Gamma^2\left(\frac{b+1}{s}\right) - \lambda_1 \Gamma\left(\frac{b+1}{s}\right) \Gamma\left(\frac{b+3}{s}\right) = 0 \\ \Gamma^2\left(\frac{b+3}{s}\right) - \lambda_2 \Gamma\left(\frac{b+2}{s}\right) \Gamma\left(\frac{b+4}{s}\right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{\bar{M}_1^2}{\bar{M}_0} ; \quad \lambda_2 = \frac{\bar{M}_2^2}{\bar{M}_1 \bar{M}_3} \quad (7)$$

Решение системы (6) неприемлемо для инженерной практики из-за аналитических трудностей. Чтобы избежать их, предложена номограмма для определения s и b как координат точки пересечения кривых, соответствующих найденным по формулам (7) параметрам λ_1 и λ_2 . Однако при построении номограммы достаточно ограничиться семейством кривых только I-го уравнения системы (6), т.к. при $\lambda_1 = \lambda_2$ кривая второго уравнения получается из кривой первого уравнения параллельным переносом последней на -1 вдоль оси b .

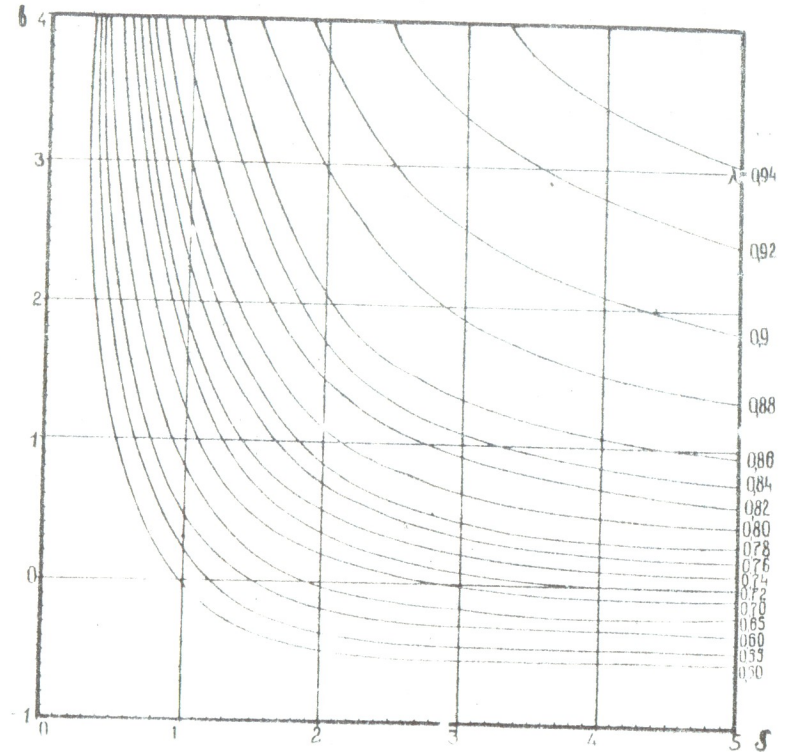


Рис. 2. Номограмма определения параметров 3-х параметрической формулы

Значения C и A вычисляются по соответствующим формулам, вытекающим из системы (6). К недостаткам данного способа следует отнести субъективную погрешность, присущую методу номограмм вообще. Очевидно, что данного недостатка лишена предлагаемая в работе программа для определения параметров универсальной формулы на ЭЦВМ. Для разработки алгоритма и программы задача ставилась следующим образом: необходимо так подобрать параметры формулы (2), чтобы она наилучшим образом аппроксимировала эмпирическую плотность вероятности распределения в смысле метода наименьших квадратов. Решение этой задачи производилось минимизацией логарифма функции вида (2) методом наименьших квадратов:

$$W^2 = \sum_{i=1}^N [\ln \psi(\xi_i) - \ln A + b \ln \xi_i + c \xi_i^s]^2 = \min \quad (8)$$

Задавшись значением S , решают систему уравнений, полученную из (8) и находят A ; b ; c . Затем, вычисляется оценочная функция W^2 . После этого S изменяется на шаг j и вычисляется новое значение W^2 . Полученные значения A ; b ; c будут удовлетворять условию метода наименьших квадратов лишь при выполнении неравенства:

$$W^2 < \theta \quad (9)$$

где θ — принятая мера точности.

Разработанная программа предусматривает вычисление моментов (начальных и центральных) по данным наблюдений, а также по формуле аппроксимации. Время нахождения параметров не более 2-3 минут. Алгоритм и программа составлены для ЭЦВМ "Минск-22" и зарегистрированы в республиканском фонде алгоритмов и программ.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена теоретическому обоснованию возможности использования фотоэлектрического метода сканирования узкой щелью частиц в потоке.

При фотоэлектрическом методе сканирования частиц с помощью

узкой щели о размерах судят по их проекции на плоскость сканирования. При этом информацию об определяющем признаке частиц можно получить по следующим размерам:

- 1) l — расстояние между параллельными касательными, проведенными к контуру проекции перпендикулярно направлению сканирования;
- 2) β — наибольший размер сечения проекции частицы плоскостью перпендикулярной плоскости проекции;
- 3) S_z — площадь проекции частицы.

В связи с этим представляет интерес выяснение взаимосвязи размеров l ; β ; S_z , определенных способом сканирования узкой щелью. Для этого выяснения использован метод параболической интерполяции функций, описывающих контур проекций частицы. При этом получена следующая взаимосвязь указанных размеров:

$$S_z = \frac{2}{3} l \beta \quad (10)$$

Кроме того, для сравнения этих размеров с геометрическими размерами частиц, определяемыми, например, как среднееарифметическое длины l_{max} и ширины l_{min} проекции частицы на предметное стекло (ГОСТ 9206-70) либо как среднегеометрическое, необходимо решить вопрос о связи величин l ; β ; S_z со среднееарифметическим $\frac{l_{min} + l_{max}}{2}$ и среднегеометрическим диаметрами $\sqrt{l_{min} l_{max}}$.

Особый интерес представляет выяснение связи этих размеров при конкретно заданном аналитическом выражении, описывающем контур проекции частицы. Для решения этих вопросов мы предположили, что проекции всех частиц имеют строго эллиптическую форму. При этом нами было доказано К — свойство эллипса, заключающееся в следующем:

$$l \beta = l_{min} l_{max} \quad (11)$$

где l_{min} — наименьшая ось эллипса (ширина проекции частицы)
 l_{max} — наибольшая ось эллипса (длина проекции частицы).

Наличие К-свойства у эллипса говорит о том, что произведение вели-

чин λ и β , измеряемых при сканировании узкой щелью, дает характеристику частицы (если она эллиптическая), независимую от случайного положения частицы относительно щели сканирования. Следовательно, среднегеометрический диаметр частицы также не зависит от ориентации относительно щели сканирования в отличие от среднеарифметического диаметра.

Однако, все вышесказанное относится к проекциям частиц эллиптической формы. Проекция же частиц сыпучих материалов, в основном, далеко не эллиптически. Вместе с тем, нами выдвинута гипотеза так называемой статистической квазиэллиптичности. Совокупность частиц, случайно расположенных по отношению к оси сканирования будем называть статистически квазиэллиптической, если:

1) между величинами $\sqrt{l_{min} l_{max}}$ и $\sqrt{\lambda_i \beta_i}$ имеет место устойчивая (с коэффициентом корреляции близким к единице) корреляционная зависимость, причем коэффициент регрессии $\sqrt{l_{max} l_{min}}$ относительно $\sqrt{\lambda_i \beta_i}$ будет близок к единице, как это соответствует К-свойству;

2) между величинами $\sqrt{S_{\lambda_i}}$ и $\sqrt{\lambda_i \beta_i}$ имеет место устойчивая (с коэффициентом корреляции близким к 1) корреляционная зависимость, причем коэффициент регрессии $\sqrt{S_{\lambda_i}}$ относительно $\sqrt{\lambda_i \beta_i}$ будет близок к $\frac{1}{2}$.

Методом корреляционного анализа было установлено, что гипотеза статистической квазиэллиптичности выполняется для широкого класса порошков, отличающихся по своим физико-химическим свойствам и способам получения: рисовая мука, пшеничная мука, порошок двуокиси вольфрама - полученных дроблением; порошок олова, свинца - способом расплавления расплавленного металла.

Все приведенные выше рассуждения относятся к проекциям частиц. Проведенные нами эксперименты показали, что свойством статистической квазиэллиптичности обладают проекции частиц на любую плоскость.

Это свойство частиц мы назвали статистической квазиэллипсоидностью. Знание формы частиц позволяет перейти от площади проекции частиц, определяемой при сканировании узкой щелью, к ее объему, весу. Например, объем частицы в условиях квазиэллипсоидности определяется выражением

$$V = \frac{1}{6} \pi \lambda \beta \gamma \tag{12}$$

где γ - отрезок прямой, проходящей внутри эллипсоида через центр эллипса проекции перпендикулярно плоскости проекции.

Это, в свою очередь, позволяет решить такой важный вопрос, как переход от кониметрического распределения, определяемого при сканировании щелью площадей проекции частиц, к гравиметрическому распределению, которым часто удобнее пользоваться для ведения технологических процессов. Нужно отметить, что принятые в настоящее время методы перехода этих распределений теоретически обоснованы только для частиц правильной формы и не учитывают форму реальных частиц. Поэтому, в данной работе предлагается метод трансформации распределений, основанный на предположении статистической квазиэллипсоидности частиц исследуемого порошка.

Если допустить, что случайные величины λ , β подчиняются нормально-логарифмическому закону распределения (что было проверено для ряда порошков), то, учитывая, что V пропорционален кубу среднегеометрического диаметра эллипсоида, получим также нормально-логарифмический закон гравиметрического распределения:

$$F_m(\xi) = \Phi \left[\frac{\ln \xi - (\ln \xi_0 + 3\sigma^2)}{\sigma} \right] \tag{13}$$

В случае, когда кониметрическое распределение описывается трехпараметрической формулой вида (2) гравиметрическое распределение имеет следующий вид:

в. 0 12474

$$F_m(\xi) = \frac{\Gamma\left(\frac{\beta+4}{5}; \xi\right)}{\Gamma\left(\frac{\beta+4}{5}\right)} \quad (14)$$

Для проверки полученных выводов гравиметрические распределения пшеничной муки и порошка олова, определенные на седиментационных весах Фигуровского, сравнивались с теоретическими гравиметрическими распределениями. При этом получена удовлетворительная согласованность данных седиментационного анализа с теоретическим распределением. Таким образом, осуществленная в работе трансформация характеристик распределения расширяет возможность фотоэлектрического метода сканирования щелью.

Одним из важных вопросов, возникающих при теоретическом исследовании фотоэлектрического метода сканирования проекции частиц, является выяснение функциональной зависимости геометрических размеров частиц (L ; β ; S_z) с параметрами фотоимпульсов, сформированных на выходе измерительного преобразователя. Анализ функциональных зависимостей геометрических размеров частиц L и β от соответствующих параметров фотоимпульса a (амплитуда) и T (длительность) указывает на неоднозначность этих зависимостей, так как одним и тем же частицам могут соответствовать в зависимости от их ориентации относительно щели сканирования различные значения параметра a либо T . При этом погрешность измерения размеров по Фере (L) и Мартину (β) будет соответственно зависеть от формы частиц. В случае определения площади проекции частицы по параметру фотоимпульса aT погрешность измерения, зависящая от формы частиц, уменьшается с увеличением размеров частиц. Наименьшей погрешностью обладает метод сканирования щелью при определении площади проекции частицы по площади импульса.

Далее, в работе проводятся теоретические исследования устройства для подачи частиц в зону измерения без предварительной подго-

товки пробы к анализу. В основу указанного устройства положен электростатический дозатор, предложенный в работах Мяздрикова С.А. В данном дозаторе используется явление взаимодействия поля заряженной материальной частицы с электрическим полем межэлектродной области плоскопараллельной системы электродов. Помещенные в межэлектродное пространство плоского конденсатора частицы порошка совершают автоколебательное движение. Задача вывода этих частиц из объема конденсатора решена путем создания избыточного давления воздуха в объеме конденсатора. В результате этого, выходящий через трубку дозатора поток воздуха выносит исследуемые частицы одну за другой. Важным условием применимости электростатического дозатора является равенство скоростей частиц на выходе из трубки, что, естественно, влияет на точность измерения определяющего признака частицы. В работе предпринята попытка теоретически обосновать возможность выравнивания скоростей частиц различных размеров на нижнем торце выходной трубки дозатора. Для этого составлены уравнения движения частиц на различных этапах. Решение этих уравнений указало на принципиальную возможность выравнивания скоростей частиц до скорости воздушного потока. Анализ полученных решений показал, что теоретически "полное" выравнивание частиц достигается при длине трубки $L_{\text{труб}} \rightarrow \infty$. Однако, задавшись определенной погрешностью в значении скоростей частиц на срезе выходной трубки, можно определить практически допустимую длину выводной трубки. Кроме того, по приведенным в работе формулам можно оценить остальные конструктивные параметры устройства.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена экспериментальному исследованию процессов подачи и сканирования частиц в зоне измерения.

На основании рекомендаций, приведенных в третьей главе, был создан макет измерительного преобразователя, в основу которого по-

ложен фотоэлектрический метод сканирования частиц узкой щелью.

Измерительный преобразователь включает в себя:

- а) сканирующую систему;
- б) электростатический дозатор для подачи частиц в зону измерения.

Принцип работы измерительного преобразователя заключается в следующем: электростатический дозатор подает частицы исследуемого порошка в зону измерения, расположенную в плоскости резкого изображения микроскопического объекта. При пересечении частицей светового потока, создаваемого проекционной лампой и конденсором, теневое изображение частицы проецируется при помощи микроскопического объектива на плоскость щели сканирования. При этом происходит затенение частицей щели сканирования, а следовательно, уменьшение светового потока, падающего на фотокатод светоприемника. Изменение светового потока сопровождается изменением тока светоприемника, т.е. на его нагрузочном резисторе будет сформирован электрический импульс, содержащий информацию об определяющем признаке частицы.

Исследование работы сканирующей системы было направлено на выявление условий, при которых достигается линейная зависимость преобразования, т.е. условий, при которых сигнал на выходе сканирующей системы прямо пропорционален определяющему признаку частицы. Кроме того были разработаны рекомендации по выбору элементов сканирующей системы.

Необходимость анализа тонкодисперсных порошков требует выбора ширины щели порядка нескольких микрон и даже десятых долей микрона, что является весьма сложной технической задачей. Применение же в экспериментальной установке микроскопического объектива с увеличением 10^x позволяет увеличить ширину щели во столько же раз. Размеры сканирующей щели при этом были выбраны $10 \text{ мкм} \times 3000 \text{ мкм}$, что позво-

лило анализировать гранулометрический состав порошков с размахом от нескольких микрон до сотен микрон. Для нахождения оптимального режима работы светоприемника, в качестве которого выбран ФЭУ, было исследовано влияние на соотношение сигнал/шум следующих факторов: освещение световыми потоками с различной длиной волны, освещение световыми потоками различной интенсивности, изменение величины напряжения питания ФЭУ, изменение величины нагрузочного резистора. Наилучшего соотношения сигнал/шум удалось добиться при освещении световым потоком с непрерывным спектром при постоянном анодном токе ФЭУ порядка $30 \times 10^{-6} \text{ а}$, напряжении питания 900 в и нагрузочном резисторе $R_n = 10^4 \text{ ом}$. Применение усилителя с коэффициентом усиления $K_{ус} = 50$ позволяет получить амплитуду сигнала $U = 10 \text{ в}$ от шарообразной частицы с диаметром 200 мкм и $U = 0,1 \text{ в}$ от частицы с диаметром 2 мкм, что достаточно для создания схемы преобразования импульсов, поступающих на вход анализатора. При этом уровень усиленных усилителем шумов ФЭУ составляет менее 0,03 в.

Выяснение зависимости падения напряжения на нагрузочном резисторе ФЭУ от размера частицы, а также определение чувствительности измерительного преобразователя осуществлялось двумя способами: в статике и в динамике. При статических исследованиях в качестве имитатора частиц использовался микропровод различного диаметра, который помещался в плоскость резкого изображения объектива. При динамических исследованиях частицы различных размеров, имеющие форму близкую к форме шара, наносились на предметное стекло, которое колебалось в плоскости резкого изображения микроскопического объектива. Результаты экспериментов проведенных в статике и в динамике указывают на линейную зависимость амплитуды импульсов от размеров частиц. При этом чувствительность измерительного преобразователя составляет 50 мв/мкм.

В работе рассмотрены основные источники погрешностей, внося-

мых сканирующей системой в результате измерений определяющего признака частиц;

- а) изменение коэффициента пропускания света частицами различных порошков;
- б) дефокусировка частиц из-за отклонения их положения от плоскости резкого изображения;
- в) "краевой эффект";
- г) недостаточное пространственно-временное разрешение.

Для анализа погрешностей, возникающих за счет изменения коэффициента пропускания света частицами различных порошков в работе предложена методика определения коэффициента пропускания. Экспериментальные данные, полученные при анализе частиц пшеничной муки, рисовой муки, порошков S_n ; WO_3 ; Cu и других сыпучих материалов, имеющих размеры от нескольких микрон и выше, указывают на практическую независимость коэффициента пропускания от их размера и материала. Для этих порошков измерительный преобразователь, основанный на фотоэлектрическом сканировании площади проекции частиц, не требует тарировки при переходе к измерениям от одного порошка к другому. Если же разброс значений коэффициента пропускания света достаточно велик (для порошка кварцевого стекла, поваренной соли и т.д.) проводить анализ по площади проекции частицы или по размеру Мартина нецелесообразно. В этом случае следует проводить измерения размера по Фере.

Для анализа погрешностей измерения за счет дефокусировки частиц был произведен расчет распределения освещенности в случае сфокусированной и расфокусированной частицы. Данные для построения графика зависимости изменения амплитуды импульса для частиц различных размеров (2-200 мкм) при их дефокусировке от 0 до 150 мкм были рассчитаны на ЭЦМ. Анализ полученного графика показывает, что

при определении размеров частицы только по амплитуде сигналов (т.е. в случае амплитудной модуляции светового потока) частицам разного размера соответствует одна и та же амплитуда сигнала. Эта неоднозначность результатов приводит к существенным искажениям анализа гранулометрического состава. В случае же анализа размеров частиц по площади их проекции измерения производятся по площади импульса. В этом случае световой поток от сфокусированной частицы равен световому потоку от расфокусированной частицы. Следовательно, устраняется погрешность измерений, присущая методам анализа размеров частиц только по амплитудам, либо длительностям импульсов. Кроме того, анализ приведенных в работе формул указывает пути уменьшения влияния дефокусировки на точность измерения: уменьшение апертуры микрообъектива, а также уменьшение размеров зоны, в которой движутся частицы при выходе из дозатора.

Погрешности измерения, обусловленные "краевым эффектом", т.е. выходом части проекции частицы за пределы сканирующей щели, полностью исключены за счет сканирования щелью сразу же на торце выходной трубки дозатора. Причем, длина щели выбрана равной внутреннему диаметру трубки. Это также позволяет существенно уменьшить погрешности измерений за счет выхода частиц из плоскости резкого изображения объектива. Кроме того, для предотвращения расширения потока частиц на выходе трубки применена отсасывающая трубка.

Анализ погрешностей, связанных с пространственно-временным разрешением сканирующей щели, был проведен для различных режимов работы дозатора с помощью фотографического метода. Данный анализ показал, что выбором режима работы дозатора можно добиться коэффициента просчета частиц, составляющего менее 0,5%.

В работе проводятся исследования предложенной конструкции электростатического дозатора, выполняющего операцию подачи частиц в зону сканирования. При определении возможности применения газара-

ботанной конструкции дозатора для анализа гранулометрического состава различных порошков нами были использованы данные, полученные О.А.Мяздриковым при определении напряженности электрического поля, необходимой для отрыва сферических частиц различных размеров широкого класса порошков от электрода. Это позволило рекомендовать значение напряженности порядка $(5-10) \times 10^5$ в/м электрического поля дозатора, при котором частицы широкого класса порошков устойчиво подаются в зону сканирования. При использовании электростатического дозатора принципиально важно, чтобы он не вносил искажений в гранулометрический состав исследуемого порошка. В связи с этим необходимо было изучить влияние на искажение гранулометрического состава следующих факторов: напряженности поля в межэлектродной области, избыточного давления в камере дозатора, длительности его работы. Проведенный многофакторный анализ позволил сделать вывод, что влияние вышеуказанных факторов на искажение гранулометрического состава порошков следует считать незначительным.

В работе проведено определение скоростей частиц по фазам движения в зоне сканирования при различных режимах работы дозатора методом скоростной киносъемки с помощью камеры СКО-ИН. По данным экспериментов вычислялись значения относительной среднеквадратичной погрешности δ_V , с которой можно считать скорости частиц в конкретном эксперименте постоянными. По приведенным в работе многочисленным экспериментам наибольшее значение $\delta_V = 11\%$ при скорости частиц $V = 1$ м/с, получено при следующем режиме работы дозатора:

$$U = 150 \text{ н/м}^2; L_{\text{трыв.}} = 7 \times 10^{-2} \text{ м}; d_{\text{трыв.}} = 3 \times 10^{-4} \text{ м}; E = 4 \times 10^5 \text{ в/м.}$$

ПЯТАЯ ГЛАВА посвящена описанию и применению разработанной системы анализа гранулометрического состава дисперсных сред. Результаты теоретических и экспериментальных исследований данной работы являются основой создания опытного лабораторного образца

автоматической системы анализа дисперсности порошков. Разработанная автоматическая система анализа гранулометрического состава порошков состоит из следующих блоков:

- 1) первичного измерительного преобразователя, включающего в себя сканирующую систему и электростатический дозатор;
- 2) электронного блока, преобразующего импульсы с измерительного преобразователя в импульсы, необходимые для ввода в анализатор импульсов;
- 3) анализатора импульсов, необходимого для получения гистограммы распределения определяющего признака частиц;
- 4) цифропечатающего устройства и устройства вывода данных с анализатора импульсов на ЭЦМ для вычисления параметров закона распределения.

В главе приведено описание основных узлов и деталей измерительного преобразователя, электронного блока системы.

Произведена оценка погрешностей измерения и анализа гранулометрического состава дисперсных сред, проводимого разработанной автоматической системой. Анализ погрешностей показывает, что наиболее ощутимый вклад вносят погрешности, вызванные вариацией скорости различных частиц в момент сканирования и погрешности электронных узлов схемы. При рассмотренной реализации автоматической системы измерения и анализа дисперсности порошков среднеквадратичная погрешность в определении площадей проекций частиц не превышает 12%. Однако, при гранулометрическом анализе нас интересуют размеры не отдельных частиц, а кривые (гистограммы) их распределения. Качество же гистограммы определяется относительной погрешностью ее частот в каналах (классах) анализатора, зависящей как от точности измерения определяющего признака, так и от характера разбиения на классы размаха размеров частиц исследуемой дисперсной среды. Отсюда получены результаты оценки погрешностей при оптимальному квантованию размаха

овокупности были установлены границы классов на анализаторе, что позволило получить погрешности частот по классам не более 14%.

Градуировка автоматической системы измерения и анализа дисперсности сыпучих материалов производилась на частицах различных порошков, предварительно расфракционированных сепарирующим устройством на узкие фракции. Анализ гранулометрических составов этих фракций был проведен с помощью разработанной автоматической системы и микроскопическим методом. Наибольшее расхождение полученных данных достигало 14%.

С помощью разработанной автоматической системы измерения дисперсности сыпучих материалов были проведены анализы гранулометрических составов различных порошков, отличающихся не только по своим физико-химическим свойствам, но и способам получения. Для каждой из полученных гистограмм согласно разработанной для ЭЦМ программы были вычислены параметры и моменты кривых распределений. Следовательно, в результате такого анализа исследователь получает дополнительную информацию о гранулометрическом составе исследуемых сыпучих сред. Это дает возможность рекомендовать данную систему в качестве прибора контроля технологических процессов и в автоматических системах управления размалывающими агрегатами. Кроме того, представляется возможным связать параметры кривых распределений размеров частиц на выходе размалывающих агрегатов с режимом замалывания. Получение функциональных либо корреляционных связей между этими параметрами дает возможность выработать рекомендации по выбору регулирующих органов размалывающих агрегатов. Таким образом, исследователь получит возможность создавать сыпучие среды с заданной дисперсностью.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ.

На основании полученных гистограмм и распределительных кривых дисперсности, вычисленных с помощью разработанной системы, были

проекций частиц дисперсных материалов можно сделать следующие выводы.

1.Широкое применение сыпучих материалов в пищевой, химической и других отраслях промышленности вызывает необходимость исследования и совершенствования автоматических систем измерения дисперсности сыпучих материалов.

2.Предложена и исследована новая модификация фотоэлектрического метода измерения дисперсности сыпучих материалов, позволяющая проводить анализ без каких-либо специальных операций, требующих значительных затрат времени на подготовку пробы к анализу.

3.Проведен теоретический анализ оптимального объема счетной выборки, обеспечивающего при заданных точности и надежности наилучшее приближение эмпирической функции распределения к теоретической.

4.Рассмотрен вопрос о методе построения гистограмм. При этом учтены размах исследуемой дисперсной среды, аппаратная погрешность измерения определяющего признака. Даны рекомендации по выбору ширины и числа каналов многоканальных анализаторов для их применения в автоматических системах измерения дисперсности.

5.Предложены методы определения параметров универсальной трехпараметрической формулы, применяемой для описания порошков с одномодальным распределением плотности вероятности. Разработана номограмма, а также программа для ЭЦМ "Минск-22", позволяющая по экспериментальным данным вычислять параметры универсальной формулы.

6.Исследована связь геометрических размеров частиц по Мартину и Фере с площадью проекции частиц на плоскость сканирования для широкого класса порошков. Разработана теория статистической квазиэллипсоидности частиц, сформулированы требования статистической квазиэллипсоидности и доказана применимость этой теории для широкого класса порошков.

7. Предложен метод трансформации кониметрической характеристики в гравиметрическую, основанный на предположении статистической квазиэллипсоидности частиц рассматриваемого порошка. Экспериментальная проверка показала удовлетворительную сходимость экспериментальных данных с теоретически рассчитанными.

8. Рассмотрена связь геометрических размеров частиц с параметрами фотопимпульса, получаемого при сканировании проекции частиц узкой щелью. При этом доказано, что наименьшей погрешностью обладает метод сканирования узкой щелью при определении площади проекции частицы по площади импульса.

9. Теоретически исследована возможность создания устройства для подачи частиц в зону измерения. Приведена методика расчета конструктивных параметров устройства.

10. На основании разработанных теоретических рекомендаций создан измерительный преобразователь, в состав которого входит сканирующая система и электростатический дозатор. Определены точностные характеристики измерительного преобразователя при различных режимах его работы.

11. Создан опытный лабораторный образец автоматической системы для измерения и анализа дисперсного состава порошков. Система состоит из измерительного преобразователя; электронного блока, формирующего импульсы измерительного преобразователя для ввода в анализатор; анализатора импульсов; цифropечатающего устройства и устройства ввода данных с анализатора импульсов на ЭЦМ для вычисления параметров закона распределения. Погрешность получения кривой распределения не превышает 14%. Время измерения составляет 3-5 минут, при этом анализируется не менее 50000 частиц и вычисляются параметры кривой распределения. Опытный лабораторный образец автоматической системы внедрен на опытном заводе ВНИИТ г.Москвы, а также

испытан на Одесском комбинате пищевых концентратов.

12. Комплексная экономическая эффективность от внедрения разработанной автоматической системы измерения дисперсности сыпучих материалов на заводе ВНИИТ г.Москвы составит 29000 руб. в год, а на Одесском комбинате пищевых концентратов - 16000 руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ (в соавторстве):

1. К вопросу автоматического измерения и анализа тонкодисперсных сред. Материалы 2-й Всесоюзной конференции. "Механика сыпучих материалов". Одесса, 1971.
2. Исследование дозирования тонкодисперсных порошков при дифференциальных методах анализа гранулометрического состава. Материалы отраслевой научно-технической конференции Министерства электротехнической промышленности СССР. "Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока". ВНИИТ, Москва, 1972.
3. Предпосылки к автоматизации измерения и анализа гранулометрического состава тонкодисперсных сред методом сканирования узкой щелью. Материалы отраслевой научно-технической конференции Министерства электротехнической промышленности СССР. "Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока". ВНИИТ, Москва, 1972.
4. К автоматическому анализу дисперсного состава твердой фазы аэрозоля. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972.
5. Алгоритм программы "Определение параметров универсальной формулы, применяемой для описания дисперсного состава сыпучих сред". Республиканский фонд алгоритмов и программ. №2244. Киев, 1972.

6. Программа для ЭЦВМ "Минск-22" "Определение параметров универсальной формулы, применяемой для описания дисперсного состава сыпучих сред". Республиканский фонд алгоритмов и программ. №2245. Киев, 1972.
7. Автоматический анализ дисперсного состава твердой фазы аэрозоля. "Материалы Одиннадцатой Всесоюзной конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем." Одесса, 1972.
8. Об одном вопросе анализа гранулометрического состава тонкодисперсных сред. "Теоретические основы химической технологии." АН СССР. Том вып. I. Москва, 1973.
9. К решению параметрической задачи при анализе дисперсного состава твердой фазы аэрозоля. "Физика аэродисперсных систем." Вып. 9. Киев, 1973.
10. О поглощении света микрочастицами. "Физика аэродисперсных систем" Вып. II. Киев, 1974.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ДОЛОЖЕНЫ:

1. На отраслевой научно-технической конференции Министерства электротехнической промышленности СССР. Калинин, 1971.
2. На 2-й Всесоюзной конференции по механике сыпучих материалов. Одесса, 1971.
3. На 2-й Всесоюзной конференции по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972.
4. На II-й Всесоюзной конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, 1972.
5. На совещании отраслевого научно-технического совета Министерства электротехнической промышленности СССР. Ленинград, 1972.
6. На совещании научно-технического Совета Министерства химического машиностроения СССР. Москва, 1972.
7. На научных конференциях Одесского технологического института им. М.В.Ломоносова, 1970-1973.

БР 04148 от 10.01.75 г. Формат 60x84 1/16.
Объем 2 п.л. Тираж 200 экз, Заказ № 87.
Городская типография Одесского облигграфиздата
г. Одесса, Ленина, 49.