

Автор ер.

Н-28

СРЕДНЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
У С С Р  
ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

НАРЕМСКИЙ  
НИКОЛАЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕЛЕКЦИИ ПОРОШКОВ,  
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОСТИ

Специальность 05.02.14 - машины и агрегаты  
пищевой промышленности

Перу ер 1984

А в т о р е ф е р а т

диссертация на соискание ученой степени доктора  
технических наук

Одесса - 1978

Поверніть книгу не пізніше  
зазначеного терміну


институте пице-

г.Одесса.

Защита состоится "16" февраля 1978г. в 10<sup>15</sup> час.  
на заседании специализированного совета Д 068.35.02 при Одесском  
технологическом институте пищевой промышленности имени М.В.Ломоно-  
сова (270039, г.Одесса-39, ул.Свердлова,112).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности им. М.В.Ломо-  
носова.

Автореферат разослан "12" декабря 1978г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

12

ОБРАЗ  
Интенсификация проце

20.06.12



v013271

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Существующие методы разделения тонко-дисперсных порошков не обладают достаточной четкостью сепарации, что заставляет многократно повторять процесс разделения и снижает эффективность производства. Отсутствие методов с достаточной четкостью разделяющих тонкодисперсные порошки не позволяет обеспечить и надежный контроль дисперсного состава. Последнее обстоятельство затрудняет решение вопросов разработки АСУТП, так как создать техническое обеспечение для АСУТП можно на основе системы измерительных приборов, обеспечивающих объективную информацию о ходе всех этапов технологического процесса. К сожалению, создание измерительных устройств часто затруднено отсутствием легко измеряемых признаков характерных параметров технологического процесса, что вынуждает искать и устанавливать косвенные признаки, имеющие корреляционные связи (функции соответствия) с измеряемыми параметрами.

В значительной мере свойства порошков зависят от способа получения частиц, материала, размера частиц, формы, состояния порошка. Одной из наиболее важных проблем порошковой технологии является проблема определения дисперсного состава (размеров и формы частиц) порошков. К проблемам порошковой технологии следует отнести также и проблему измерения степени агрегирования порошков. Агрегаты частиц могут принимать очень сложную форму, не соответствующую способу получения порошка. Причем агрегирование частиц порошка приводит к значительным погрешностям при определении их физико-механических свойств. Особенно актуальна задача измерения агрегатного состояния порошков при изготовлении компонентных изделий.

Измельчение дает возможность получить порошки с довольно широким диапазоном размеров. Процесс измельчения необходимо контро-

Одесский технологический  
институт пищевой промыш-

2013271

лизовать с целью получения порошка с заданными и стабильными во времени свойствами. Большая энергоемкость процесса измельчения вызывает необходимость ведения процесса на оптимальных режимах, что повышает требования к устройствам технического обеспечения АСУ такими процессами. Аналогичные требования к устройствам технического обеспечения АСУ предъявляет технологический процесс получения порошков сушкой распла экстракта.

Зачастую при диспергировании ставится задача получения порошков с заданными свойствами поверхности частиц. Это требование относится к порошкам, применяемым в качестве адсорбентов и катализаторов. Здесь очень важно оценить поверхностную активность частиц.

Помимо свойств отдельных частиц часто требуется оценить порошок по взаимодействиям между частицами. Механические взаимодействия между частицами порошка, приводящие к образованию агрегатов (вторичных частиц) являются основными взаимодействиями внутри системы, которые влияют на истечение порошка из отверстий, слеживаемость, коэффициент внутреннего трения. Причем внутренние механические взаимодействия могут приводить как к обратимым, так и необратимым явлениям.

Механические взаимодействия между частицами порошка необходимо учитывать при изучении текучести порошков, давления внутри засыпки порошка, при определении физико-механических свойств, проницаемости слоя порошка газами и жидкостями, при формовке, прессовании и пекании. При этом следует учитывать, что последние процессы зависят еще и от материала частиц, их объемных свойств, состояния поверхности и формы.

При внедрении АСУТП в порошковые производства первостепенное значение имеют методы экспрессного автоматического контроля дис-

персности. Процесс измерения дисперсности отличается существенной особенностью, заключающейся в том, что дисперсный состав не может определяться одним показателем. Таких показателей должно быть не менее двух, которые могут быть получены только после обработки данных измерений признаков совокупности частиц и сложных вычислений. Последнее требует автоматизации технических средств для контроля дисперсности порошков. Научное обоснование и разработка принципиально новых методов разделения порошковых материалов, позволяющих интенсифицировать этот процесс и создать автоматизированные системы для экспрессного контроля дисперсности порошков, обеспечивающих объективную информацию на всех этапах технологического процесса, имеет первостепенное значение для создания совершенных АСУТП.

Таким образом, проблема совершенствования порошковых технологий заключается в разработке новых высокоэффективных устройств для селекции порошков и технических средств для контроля дисперсности, что обеспечит получение прецизионных порошков со строго заданным дисперсным составом. Решение указанной проблемы немислимо без разработки теории селекции частиц порошков, создания надежных, простых в эксплуатации и высокоточных устройств технического обеспечения АСУ, а также способов и устройств, обеспечивающих стабилизацию состояния порошков перед анализом дисперсности и сепарацией.

В связи с изложенным основная цель работы состоит в научном обосновании и разработке принципиально нового метода селекции порошковых материалов, позволяющего не только интенсифицировать процесс разделения, но и создавать комплексно автоматизированные системы контроля дисперсности.

Методы исследований. В работе использованы методы теории электрического поля, теории вероятностей и математической статистики. В экспериментальных исследованиях были использованы микроскопический, седиментационный, ситовой методы дисперсного анализа и метод многофакторного планирования эксперимента. Для изучения динамики заряженных частиц в переменном однородном электрическом поле был использован метод скоростной киносъемки. Для изучения состояния поверхности частиц использован метод электронной микроскопии (исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе).

Научная новизна работы заключается:

1. В разработке основ теории селекции микропорошков в однородном переменном электрическом поле высокой напряженности.
2. В разработке эффективного способа разрушения агрегатов частиц порошков в переменном поле высокой напряженности при малом межэлектродном расстоянии.
3. В создании метода расчета объема репрезентативной выборки и метода определения оптимальной ширины дифференциального коридора, обеспечивающего минимальное искажение топологической информации при контроле дисперсности порошков.
4. В разработке основ теории и практических рекомендаций для проектирования измерительных преобразователей контроля дисперсности порошков, основанных на электрогравитационном методе селекции порошков и методе зондирования излучением взвеси частиц пробы порошка в переменном электрическом поле.
5. В создании основ теории и разработке практических рекомендаций для проектирования измерительных преобразователей контроля дисперсности порошков, основанных на взаимодействии ионизирующего излучения со слоем пробы порошка.

6. В создании комплексно автоматизированной системы для контроля дисперсности порошков, основанной на новой модификации фотометрического метода.

Практическая ценность работы заключается в том, что рекомендации, полученные на основании исследований автора и разработанные им методы, нашли применение при создании оригинального устройства для классификации порошков; устройства для подготовки пробы порошка к дисперсному анализу; измерительного преобразователя двухканального типа для контроля параметров, характеризующих дисперсность порошков; прибора для контроля дисперсности порошков, основанного на зондировании излучением аэрозольного облака, образуемого электрическим полем высокой напряженности, и комплексной автоматической системы для контроля дисперсности порошков. Экспертная оценка экономической эффективности от внедрения в производство разработанных в диссертации технических средств селекции и контроля дисперсности порошков показала, что ожидаемый годовой экономический эффект составит 775 тыс. рублей.

Апробация работы. Теоретические исследования подтверждены экспериментально и нашли применение при разработке опытных и промышленных образцов сепараторов и приборов для контроля дисперсного состава порошков.

Содержание диссертационной работы докладывали на II и III Всесоюзных конференциях по применению аэрозолей в народном хозяйстве, на Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках, на Всесоюзной конференции "Средства автоматизации и контроль процессов производства источников тока", на научно-техническом Совете Всесоюзного научно-исследовательского института источников тока (г. Москва), на республиканских конференциях и семинарах.

На основании исследований и разработанных рекомендаций были созданы и прошли лабораторные и производственные испытания автоматические приборы фотоэлектрического типа для анализа дисперсного состава порошков, прибор для контроля степени окисленности свинцовых порошков, электрогравитационный классификатор тонкодисперсных порошков.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 работ и получено 2 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов и рекомендаций, списка использованной литературы (381 источник) и приложений. Объем диссертации составляет 279 страниц машинописного текста.

Содержание работы. При анализе дисперсного состава порошков важно аналитически описать закон распределения. Определение закона распределения размеров частиц исследуемой совокупности связано с необходимостью определения объема информации, обеспечивающей заданную точность и надежность искомого закона распределения.

Вопрос определения объема пробы, обеспечивающей достаточную достоверность анализа, рассмотрен нами в двух аспектах:

а) функциональная задача; б) параметрическая задача.

В том случае, если поиск направлен на отыскание функции распределения, то решение получено в виде

$$n = \left\{ \frac{K_1(1-R)}{\epsilon_p} \right\}^2, \quad (I)$$

где:  $n$  - объем пробы,  $K_1(1-R)$  - функция, обратная функции Колмогорова  $K(R)$ ,  $\epsilon_p$  - абсолютная погрешность эмпирической функции распределения.

При установлении плотности распределения, объем пробы определяется по формуле

$$Q(2\epsilon_r \sqrt{n}) = \frac{1-R}{K}, \quad (2)$$

где  $R$  - надежность,  $\epsilon_r$  - погрешность приближения частоты к вероятности события,  $K$  - число классов.

Решение параметрической задачи найдено в виде

$$n = \frac{\chi_e^2}{\sqrt{k} \cdot \epsilon_k^2}, \quad (3)$$

где  $\chi_e^2 = \sum \frac{(m_i - n p_i)^2}{n p_i}$ ,  $p_i$  - вероятность события,  $m_i$  - абсолютная частость,  $\epsilon_k$  - средняя относительная погрешность определения вероятности по классам.

Процесс квантования исследован в предположении, что дисперсный анализ порошков представляет собой стационарный случайный процесс с некоррелированными выборками, а погрешность определения частоты по классам разбиения обусловлена рассеянием результатов измерения на границах интервала. Получено решение

$$\Delta(K; a) \leq 4K\hat{\sigma} \left[ \varphi_0(a) - \frac{1}{2} \varphi_0(2a) \right] + 2 \left[ \frac{1}{2} - 2\varphi_0(a) + \varphi_0(2a) \right]^{1/4}$$

где  $\Delta(K; a)$  - абсолютная погрешность определения частоты,

$\varphi_0(a)$  - затабулированная функция Лапласа,  $a$  - нормирующий множитель,  $a = h/\hat{\sigma}$ ,  $\hat{\sigma}$  - среднеквадратическая погрешность измерения определяющего признака частиц порошка,  $K = \max |\varphi'(x)|$  - коэффициент, равный максимальному значению модуля первой производной плотности вероятности.

Погрешность замены кривой распределения горизонтальными участками определяется выражением

$$R(K; h) \leq \frac{Kh}{2}, \quad (5)$$

где  $h$  - ширина интервала квантования.

Суммарная погрешность, вызванная квантованием выборки при дисперсном анализе порошков, зависит от ширины интервала квантования и коэффициента "К", причем эта зависимость имеет минимум.

Анализ функции суммарной погрешности квантования  $E(K; a) = \Lambda(K; a) + R(K; h)$  на минимум позволил получить выражение

$$\bar{\sigma} = \sqrt{K \left\{ 0,5 + 4 \left[ \frac{\varphi(a_m) - \varphi(2a_m)}{a_m} - \frac{\varphi_0(a_m) - \frac{1}{2} \varphi_0(2a_m)}{a_m^2} \right] \right\}} \quad (6)$$

На Рис. 1 приведен график, по которому можно определить величину нормирующего множителя  $a_m$ , обеспечивающего (при данных значениях "К" и среднеквадратической погрешности измерения  $\bar{\sigma}$ ) минимальное значение суммарной погрешности квантования  $E(K; a)$ .

Из анализа формулы (6) следует, что при сохранении оптимального режима квантования увеличение ширины дифференциального коридора приводит к уменьшению точности измерения определяющего признака частицы. С ростом размаха анализируемой совокупности равнозначный анализ можно осуществлять и при помощи менее точной аппаратуры.

Экспериментальная проверка показала хорошее согласие теоретических данных с данными эксперимента по оптимальному квантованию выборочных статистик. Расхождение данных, полученных расчетом по формуле (3), с экспериментом не превышает 2%.

Введены понятия "К" - свойства эллипса и статистической квазиэллипсоидности частиц порошка, которые позволили выбрать параметр, определяющий линейный размер частицы, инвариантный положению микрообъекта по отношению к направлению сканирования. Дан анализ влияния формы частицы на относительную погрешность измерения размера частиц на примере квазиэллипсоидной совокупности. Показано, что относительная погрешность измерения среднегеометрического раз-

мера квазиэллипсоидных частиц не зависит от формы и положения проекции частицы по отношению к направлению сканирования.

Разработан метод трансформации законов распределения. Получена зависимость

$$\varphi_d(x) = \frac{x^3 \varphi_0(x)}{M_{3,0}} \quad (7)$$

дающая возможность с удовлетворительной точностью осуществлять переход от кониметрического распределения  $\varphi_0(x)$  к гравиметрическому  $\varphi_d(x)$  и наоборот.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ВЫСОКОЙ НАПЯЖЕННОСТИ

Исследование динамики заряженных частиц порошка в однородном переменном поле. Движение материальной заряженной частицы в переменном поле нами рассмотрено в предположении, что: а) заряд частицы точечный; б) отсутствует собственный магнитный момент; в) влияние неравномерности поля на поведение частицы незначительно; г) влажность, химический состав среды (газа), состояние поверхности частиц не влияют на ее поведение в поле; д) взаимное взаимодействие частиц ввиду малой концентрации пренебрежимо мало.

В общем случае классическое уравнение динамики частицы запишем в виде

$$m \ddot{z}'' = q E_0 \sin \omega t - mg + \frac{q}{c} [z; H] - \alpha z', \quad (8)$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля.

Так как изменение кинетической энергии частицы обусловлено только действием электрического поля, то формула (8) несколько упростится

$$m \ddot{z}'' = q E_0 \sin \omega t - mg - \alpha z'. \quad (9)$$

Здесь

$$\alpha = \frac{6\pi \times 10^7}{1 + [A_0 + B \exp(-\frac{cx}{\lambda}) \frac{\lambda}{x}]},$$

$\lambda$  - длина свободного пробега молекул газа,  $A_0, B, C$  - коэффициенты.

Решение дифференциального уравнения (9) методом вариации постоянной дает

$$z = \frac{Q}{\omega p} \cos \omega t_0 + \frac{g}{p^2} + \frac{V_0}{p} - \frac{g}{p} (t - t_0) - \frac{Q}{p^2 + \omega^2} (\sin \omega t + \frac{p}{\omega} \cos \omega t) + \left\{ \frac{Q}{\omega^2 + p^2} \left[ \sin \omega t_0 - \frac{\omega}{p} \cos \omega t_0 \right] - \frac{V_0}{p} - \frac{g}{p^2} \right\} e^{-P(t-t_0)}, \quad (10)$$

$$V_z = \frac{dz}{dt} = \frac{Q}{\omega^2 + p^2} (P \sin \omega t - \omega \cos \omega t) - \frac{g}{p} + \left\{ \frac{Q}{\omega^2 + p^2} [\omega \cos \omega t_0 - P \sin \omega t_0] + V_0 + \frac{g}{p} \right\} e^{-P(t-t_0)}, \quad (11)$$

где

$$P = \frac{6\pi \times 10^7}{\{1 + [A_0 + B \exp(-\frac{cx}{\lambda}) \frac{\lambda}{x}]\} m}, \quad Q = \frac{q E_0}{m}.$$

Решение дифференциального уравнения движения заряженной частицы, если пренебречь силами Стокса, при начальных условиях  $t = t_0$

$z = 0; V = V_0$  дает уравнение скорости частицы

$$z' = V_0 + \frac{Q}{\omega} [\cos \omega t_0 + \cos \omega(t_0 + \tau)] - g \tau. \quad (12)$$

Анализ условий отрыва заряженной частицы от нижнего электрода, дает

$$\sqrt{\frac{8 p^2 g}{\pi}} \leq E_0 \leq 4 \omega \sqrt{\frac{p^2 h}{\pi}}$$

Для частицы  $Ag$  ( $\rho = 1,05 \cdot 10^4$  кг.м<sup>-3</sup>), при  $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 300 = 1884$  сек<sup>-1</sup> необходим следующий интервал допустимых значений амплитуды напряженности поля  $E_0$

$$3,45 \cdot 10^5 \leq E_0 \leq 2,95 \cdot 10^7 \text{ В/м.}$$

Из уравнения (12) следует, что скорость заряженной частицы в переменном поле содержит линейную и гармоническую составляющие.

Изучение динамики заряженных частиц в межэлектродной области плоского конденсатора, питаемого переменным напряжением, нами производилось при помощи скоростной кинокамеры типа СКС-1М.

Эксперименты показали, что заряженная частица сразу же после отрыва от поверхности нижней обкладки конденсатора начинает осциллировать, достигая определенной высоты подъема над нижним электродом, и опускается на его поверхность. Получив новый заряд в процессе контакта, она снова отрывается и совершает полет. Замечено, что апоцентр траектории движения при каждом новом подъеме частицы на одинаков и зависит от величины заряда, полученного частицей в момент контакта. Однако апоцентр траектории частицы никогда не превышает определенной величины, по-видимому, зависящей от предельного заряда частицы и параметров электрического поля. То-есть всегда соблюдается неравенство  $z(t) \leq H(m)$ , где  $H(m)$  - максимально возможная высота подъема частицы массой -  $m$  для принятых параметров питания конденсатора.

Экспериментальные данные по наблюдению за движением заряженной частицы серебра, радиус которой  $r = 100$  мкм при форме близкой к идеально шаровой, сведены на графике Рис.2.

Аппроксимация экспериментальных данных формулой (12) осуществлялась на ЭВМ "Минск-32" методом наименьших квадратов. На графиках экспериментальные значения среднепутевых скоростей ( $V$ ) частицы нанесены точками (крестиками), а данные среднепутевых скоростей, полученные расчетом на машине ( $V_r$ ), представлены в виде сплошной косинусоиды. Из графика видно, что наклон средней линии функции  $V = f(\tau)$  к оси абсцисс, определяемый углом  $\psi$ , зависит от

постоянной  $\bar{A} = V_0 + \frac{q}{D} \cos \omega t$ , которая при данных параметрах поля растет с увеличением начальной скорости частицы и падает с увеличением ее радиуса. Пересечение средней линии функции с осью абсцисс определяет момент достижения частицей апоцентра траектории. Расчеты дают довольно близкие значения  $\bar{z}_{max}$  к экспериментальным данным. Данные эксперимента хорошо согласуются с данными расчетов по формуле (12).

Проведенные нами эксперименты по определению числа элементарных зарядов, получаемых частицей при контакте с плоскостью, имеющей поверхностный заряд, дали возможность рекомендовать формулу

$$N = 2,29 \cdot 10^9 E_0 \omega^2 \quad (13)$$

которая согласуется с формулой, рекомендуемой в работах Лебедева Н.М. и Скальской И.П. (ЖТФ, т.32, вып.3, 1962), а также в работах Мяздрикова О.А. (Дифференциальные методы гранулометрии, "Металлургия", М., 1974; Электрические способы объемной гранулометрии. "Энергия", Л., 1968).

Эксперименты показали, что изменение частоты поля в пределах 50 + 300 Гц не оказывает сколь либо существенного влияния на величину предельного заряда частицы, полученного при контакте.

Изучение стартовой напряженности поля показали, что с ростом линейного размера частицы сперва наблюдается снижение стартовой напряженности, а затем ее рост, что согласуется с данными работ Зимона А.Д. (Адгезия пыли и порошков., "Химия", М., 1967 и 1976, изд. I и II), Мяздрикова О.А., Дмитриева В.И. и др.

Исследование селективности переменного поля. Исследование движения заряженных частиц порошка в переменном электрическом поле позволили нам описать плотность вероятности пребывания частиц массой  $m$  на уровне  $z$  формулой

$$\varphi(z) = \frac{gm^2\omega^2}{qE\sqrt{q^2E^2 - 2gzm^2\omega^2}} \quad (14)$$

где  $q$  - заряд частицы,  $E, \omega$  - напряженность и частота поля, соответственно.

Проведенные эксперименты по определению вероятности пребывания частицы на уровне  $z$  показали идентичность аналитической и экспериментальной зависимостей. Используя формулу (14) можно по уровням подъема частиц полидисперсного порошка над нижним электродом дать оценку гравиметрического распределения. Для чего необходимо либо осуществить вывод частиц с последующим измерением их массы, либо измерить концентрацию частиц на различных уровнях от нижнего электрода плоского конденсатора. Последнее легко может быть осуществлено либо оптическим методом, либо радиоизотопным методом.

Классификация частиц осуществлялась на установке, схема которой представлена на Рис.3. Металлические электроды I закрепляются в пазах стенок, выполненных из оргстекла, и образуют плоско-параллельный конденсатор. В стенках установки (левой и правой) выполнены окна 4 и 5 на разных уровнях по отношению к нижнему электроду. Частицы, поднятые полем выше нижней кромки окна, под действием сил, вызванных неоднородностью поля, выводятся из межэлектродной области и попадают в кюветы 7 и 8. Подача порошка на нижний электрод осуществляется через загрузочное устройство 6. Сбор частиц порошка наиболее крупных фракций производится в кювете 9.

Выражение, описывающее зависимость ширины класса  $\Delta z$  выводимых частиц от конструктивных и режимных параметров установки, имеет вид

$$\Delta z = \frac{\pi E^2 \Delta \ell}{16 \rho \omega \sqrt{2gh} \bar{h}} \quad (15)$$

где  $\Delta \ell$  - высота окна отсека,  $\rho$  - плотность материала частицы,  $\bar{h}$  - расстояние между электродами,  $\Delta z$  - ширина класса выводимых

ных частиц через окно отсека установки,  $g$  - ускорение земного тяготения.

Из формулы (15) следует, что сужение ширины класса выводимых частиц можно достичь путем уменьшения отношения  $E_0^2/\omega$ , высоты окна и роста расстояния между электродами.

Вероятность вывода частицы, достигшей створа окна, через окно установки зависит от времени ее пребывания в створе окна. Анализ показывает, что время нахождения частицы в окрестностях максимума ее траектории движения не зависит ни от амплитуды напряженности поля  $E_0$ , ни от частоты  $\omega$ , а зависит только от высоты окна.

Показано, что увеличение времени пребывания частицы в окрестностях максимума, а следовательно и рост вероятности вывода частиц в окно отсека можно достичь переключением на короткий промежуток времени питания установки на выпрямленное полупериодное напряжение с пониженным амплитудным значением в  $\frac{Q}{Tg}$  раз. Нами разработаны способы оценки процесса классификации порошков: графический, параметрический и аналитический. Сравнение способов оценки четкости фракционирования показали, что наиболее простым и удобным для использования является графический метод. Метод параметрический, хотя и более трудоемкий по объему вычислений, дает возможность варьирования точностью определения четкости по желанию исследователя. Специфическим является метод аналитический, разработанный специально для оценки процесса электрогравитационной классификации на устройстве непрерывного действия, схема которого приведена на Рис.3.

Введено понятие вероятности вывода частиц "К" класса в "i" отсек -  $P_{ik}$ , которое дает возможность оценить способность устройства данной конструкции выделять частицы из порошка, принадлежащие рассматриваемому диапазону линейных размеров

$$P_{ik} = \frac{f_{ik} M_i}{f_k M} \quad (16)$$

где  $f_k$  - относительная частота гравиметрического распределения К-го класса исходного порошка,  $f_{ik}$  - относительная частота гравиметрического распределения К-го класса порошка, выделенного в i отсек установки,  $M_i$  - масса порошка, выделенного в i отсек установки,  $M$  - масса исходного порошка, загруженного в классификатор для разделения.

Дан анализ погрешностям, возникающим при определении вероятностей  $P_{ik}$ .

Лабораторные исследования электрогравитационного способа классификации производились на порошках окиси алюминия, крахмала, муке пшеничной. Многочисленные эксперименты показали, что четкость сепарирования порошков на электрогравитационном классификаторе непрерывного действия в 3 раза выше, чем при сепарации ситовым методом. На рис.4 представлены коммутенты продуктов, полученных на электрогравитационном классификаторе непрерывного действия. Сепарация порошка окиси алюминия проводилась на три фракции при напряженности поля  $E_0 = 4 \cdot 10^5$  В/м и частоте  $f = 88$  Гц. Как видно из рисунка, фракции порошка, выделяемые в I и II отсеки установки, имеют перекрывающиеся классы в интервале размеров  $20 + 40$  мкм. Выделение частиц с размерами  $< 20$  мкм довольно четко. Полное выделение, то есть довольно высокая четкость сепарирования, наблюдается и для частиц с размером  $> 50$  мкм.

Как теоретические, так и экспериментальные исследования процесса классификации порошков в переменном электрическом поле показали: 1. Что четкость разделения порошков при помощи электрогравитационного метода в 3 раза выше, чем ситового метода. 2. Эффективность классификации электрогравитационным методом повышается

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М. П. Ломоносова  
К. В. 73271  
БИБЛИОТЕКА

при переходе к выделению более тонких фракций. 3. Эффективность выделения частиц, принадлежащих рассматриваемому размерному диапазону, зависит от конструктивных параметров установки ( $\bar{h}; a; b; l$ ) и режима работы ( $E_0/\omega$ ). 4. При данных конструктивных размерах установки оптимальные параметры режима классификации зависят от того, какой диапазон размеров частиц желательно выводить из устройства. Поэтому процесс классификации порошка более рационально вести в установке циклического действия, на которой осуществляется последовательный вывод классов частиц при ступенчатом переходе на оптимальные режимные параметры работы установки ( $E_0/\omega$ ). 5. Эксперименты по классификации порошков окиси алюминия, меди, полученной распылением расплава, и бронзы показали хорошую сходимость и воспроизводимость результатов экспериментов по сравнению с методом седиментации на весах фигуровского и по сравнению с микроскопическим методом.

Разрушение агрегатов частиц с целью повышения достоверности результатов дисперсного анализа и эффективности классификации.  
Подготовка порошка к измерению линейных размеров частиц и классификации является важным этапом, от которого зависит точность определения частоты по классам разбиения и эффективность классификации.

Известен ряд методов применения поверхностно активных веществ с целью уменьшения агрегирования при приготовлении препарата для анализа. Однако применение жидких поверхностно активных веществ не всегда дает желаемый эффект, а применение высокодиспергированного дезагрегатора для классификации порошков может иметь желаемый эффект только при крупнодисперсных фракциях.

Определенную перспективу в области совершенствования и разви-

тия способов дезагрегации частиц порошков имеют электрические методы, дающие возможность эффективно воздействовать на адгезионные и аутогезионные контакты.

В диссертационной работе Еддокимова Ю.Н. (Автореферат диссертации на соискание уч.ст. кандидата химических наук, МТИЛП, М., 1968) показано, что наложением внешнего электрического поля можно нарушить либо упрочить адгезионный контакт. Мяздриков О.А. (Дифференциальные методы гранулометрии, "Металлургия", М., 1974) утверждает, что при напряженности постоянного поля  $30 + 50 \text{кВ.см}^{-1}$  кулоновские силы преодолевают силы сцепления и полностью разрушают адгезионные и аутогезионные связи.

Проведенные нами экспериментальные исследования по изучению воздействия переменного поля высокой напряженности на агрегаты частиц показали, что переменное поле весьма эффективно дезагрегирует порошки. Рост напряженности поля приводит к уменьшению математического ожидания и дисперсии пробы порошка, что говорит о увеличении числа разрушенных агрегатов. Замечено, что по мере увеличения напряженности поля интенсивность разрушения агрегатов снижается.

Показано, что увеличение времени пребывания порошка под воздействием переменного поля высокой напряженности приводит к уменьшению математического ожидания и дисперсии за счет снижения частоты в "старших" классах и роста последней в "младших" классах распределения. Для большинства исследуемых порошков увеличение времени пребывания их под воздействием поля свыше 4 мин. не приводит к сколь-либо существенному изменению дисперсности. Последнее говорит о том, что разрушению подвержены только вторичные частицы, если бы разрушению подвергались первичные частицы, то изменение дисперсного состава порошка наблюдалось бы при всех возможных значениях интер-

вала времени.

Результаты экспериментов по изучению влияния частоты поля на дисперсный состав порошка  $Al_2O_3$  представлены на Рис.5. Как видно из рисунка, наиболее интенсивное разрушение вторичных частиц наблюдается в диапазоне частот  $225 + 300$  Гц.

Изучение процесса агрегирования порошка во время хранения показало, что в начале хранения процесс агрегирования идет весьма интенсивно. Через трое суток хранения дисперсный состав порошка был близок к дисперсному составу порошка, длительность хранения которого была более 2-х месяцев.

Исследования влияния межэлектродного расстояния на процесс разрушения вторичных частиц показали, что по мере роста межэлектродного расстояния эффективность процесса разрушения агрегатов снижается, и при межэлектродном расстоянии 2,5см изменение дисперсного состава не наблюдалось. Последнее позволило выдвинуть гипотезу о комплексном воздействии на вторичные частицы как электрических, так и механических сил, возникающих при ударах вторичных частиц о поверхность электродов и между собой. В работе приведены фотографии, подтверждающие разрушение вторичной частицы после удара о электрод. Изучение снимков частиц, полученных на растровом электронном микроскопе "Стереоскан", подверженных воздействию переменным полем, и частиц, не обработанных полем, показало, что после обработки переменным полем высокой напряженности при малом межэлектродном расстоянии последние полностью освобождаются от прилипших к ним мелких частиц. Частицы, не подверженные обработке электрическим полем высокой напряженности, имели довольно большое количество мелких частичек, покрывающих ее поверхность.

Исследование методов контроля дисперсного состава порошков.  
Исследования электрогравитационного метода контроля дисперсности

были направлены на разработку классификатора периодического действия и электрогравитационного измерительного преобразователя, основанного на зондировании излучением аэрозвеси частиц пробы в межэлектродном пространстве плоского конденсатора.

Испытания классификатора периодического действия, структурная схема которого представлена на Рис.6, проведены нами на порошках: алюминия, бронзы (БРОФ 10-1 и БРОУ 8-2). Порядок проведения дисперсного анализа на таком классификаторе следующий. Навеска порошка засыпается в емкость 1, крышка 2 подводится к торцу стенок, включается питание от источника (ИП) и при повышенной напряженности производится подготовка пробы порошка к анализу. После чего напряженность медленно снижается с целью создания на нижнем электроде слоя переменной структуры. После полного отключения питания переходят на ступенчатый режим. Перед этим крышка отводится от кромки стенки так, чтобы образовался зазор порядка 3+4 мм.

Результаты классификации порошка бронзы (бр. ОФ 10-1) представлены в таблице I.

Таблица I.

№ кл. ас са	ширина класса, мкм	Исходное распределение $F(x)$	Относительная частотность			$F(x)_{ср}$	Относительная погрешность %	Режим	
			$F(x)_1$	$F(x)_2$	$F(x)_3$			В/м.	Гц.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0+10	0,998	I	I	I	I	0	$8,6 \cdot 10^5$	200
2	10+20	0,996	0,99	0,99	0,998	0,989	0,7	$9,6 \cdot 10^5$	125
3	20+30	0,808	0,81I	0,818	0,81	0,813	0,6	$9,5 \cdot 10^5$	88
4	30+40	0,208	0,207	0,212	0,21	0,209	0,4	$9,5 \cdot 10^5$	63
5	40+50	0,011	0,009	0,01	0,01	0,09	18,1	-	-

Как видно из таблицы I, сходимость определения частоты по классам вполне удовлетворительная. Воспроизводимость результатов дисперсного анализа по сравнению с микроскопическим методом, за исключением пятого класса, хорошая. Высокая погрешность определения частоты пятого класса, по-видимому, вызвана низким содержанием частиц этого класса в порошке, и, следовательно, высокой погрешностью определения массы класса.

Сущность метода контроля дисперсности порошков, основанного на зондировании излучением аэровзвеси частиц, образуемой в межэлектродной области конденсатора заключается в том, что путем измерения концентрации частиц на различных уровнях по высоте межэлектродной области конденсатора можно установить интегральное гравиметрическое распределение. В этом случае уровень зондирования будет идентифицировать размер частиц, а поглощающая способность взвешенных частиц порошка - частоту размерного диапазона.

Теоретические исследования процессов, происходящих в измерительном преобразователе электрогравитационного типа показали, что процесс ослабления  $\beta$ -излучения можно описать в общем виде формулой

$$\ln \frac{I_0}{I} = \frac{\mu}{\rho \delta \Delta z} \sum_{k=1}^n m_{kK} \psi_{kK}(z; z - \delta z) \sum_z \psi_{kK}(z), \quad (17)$$

где  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения  $\beta$ -излучения,  $\rho$  - плотность вещества частиц порошка,  $\delta$  - ширина зондирующего луча,  $\delta z$  - высота зондируемого объема взвеси,  $m_{kK}$  - масса частиц K-го класса порошка,  $\psi(z; z - \delta z)$  - вероятность пребывания частиц K-го класса в интервале  $\delta z$ ,  $\psi_{kK}(z)$  - вероятность того, что частицы K-го размерного диапазона получат предельный заряд и попадут в рассматриваемый интервал уровней.

Накопленная частота  $K^{T0}$  класса определяется из уравнения

$$F_d(x) = \frac{0,436 \cdot 10^{-10} \beta E_0^2 \Delta z}{\mu \omega \sqrt{2g \Delta z} M} \sum_{k=1}^n \frac{a_k (\ln \frac{I_0}{I})^k}{z_k}, \quad (18)$$

где  $\omega$  - частота поля,  $M$  - масса пробы порошка,  $a_k$  - коэффициент участия.

Коэффициент участия определяет суммарную вероятность пребывания частиц K-го класса пробы на уровне зондирования. Эксперименты показали, что приведенный коэффициент участия  $a'$ , равный отношению  $a_k$  к гравиметрической частоте класса, не зависит от размера частиц. В таблице 2 даны значения приведенного коэффициента участия для некоторых порошков.

Таблица 2.

№ п/п	Порошок	$a'$
1	Корунд	0,260
2	Соль поваренная	0,177
3	Мука пшеничная (высший сорт)	0,133
4	Крахмал	0,084

Структурная схема прибора, построенного на зондировании взвеси частиц пробы в переменном однородном поле, представлена на Рис.7. Измерительное устройство (ИУ) вырабатывает сигнал, несущий информацию о положении луча по отношению к нижнему электроду, который подается на вход регистрирующего устройства (РУ). При помощи задающего устройства (ЗУ) устанавливается напряжение питания и частота, а так же шаг зондирования на ИУ.

Сигнал детектора (Д) пропорционален частоте размерного диапазона частиц пробы. После модуляции полезного сигнала детектора, усиления, демодуляции, последний подается на вход РУ. В результате

на ленте самопишущего РУ фиксируется коммунента распределения частот пробы порошка по размеру.

Измерения дисперсного состава порошков корунда, поваренной соли, крахмала, муки пшеничной, огнетушащий порошок ПСБ-2и, ПСБ-3, на приборе, структурная схема которого дана на рис.7, показали, что погрешность определения гравиметрической частоты не превышает 7%. Время, затрачиваемое на анализ в автоматическом режиме работы прибора, не превышает 3 минут.

Исследование метода гранулометрии, основанного на взаимодействии ионизирующего излучения с контролируемым порошком. Идеализация процессов взаимодействия электромагнитного излучения с сыпучими телами позволила нам установить корреляционную связь между параметрами, характеризующими преобразование энергии падающего излучения и параметрами, описывающими дисперсный состав поглотителя. Исследования процесса возбуждения вторичного излучения в полидисперсной среде, состоящей из сферических частиц, позволили получить зависимость между энергетической светностью возбужденного излучения -  $M_0$  и начальным моментом первого порядка -  $M_{01}$  среды

$$M_0 = \frac{3W_2 \gamma v^2 \gamma_0}{8\pi R^2 B^2 \sin^2 \psi M_{01}} \left[ \frac{\bar{F}}{v B E} \left( e^{-\frac{v E \bar{F}}{v}} - 1 \right) + 1 \right], \quad (19)$$

где  $W_2$  - энергетический выход люминесценции,  $\gamma$  - линейный коэффициент поглощения фотоэффекта,  $v$  - линейный размер, характеризующий сечение пучка падающего излучения,  $R$  - путь, проходимый квантом возбужденного электромагнитного излучения в воздухе до детектора излучения,

$$B = \frac{R}{\sin \psi} + \frac{\lambda}{\sin \psi} ; \quad \bar{F} = \frac{\sin(\psi + \varphi)}{\sin \psi}$$

$\psi, \varphi$  - углы, определяющие геометрию опыта,  $E$  - плотность укладки поглотителя (порошка),  $\gamma_0$  - интенсивность падающего излучения.

Плотность укладки -  $E$  может быть определена по поглощению падающего излучения слоем порошка толщиной -  $d$ , тогда формулу (19) можно преобразовать

$$M_{01} = \frac{3W_2 \gamma v^2 W}{8\pi R^2 B^2 \sin^2 \psi} \frac{\gamma_0}{M_0} \left( \frac{e^{-\alpha d}}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} + 1 \right), \quad (20)$$

где  $W$  - некоторый безразмерный коэффициент, значение которого определяется экспериментом,  $\alpha = \frac{v B E \gamma_0}{M_0 E}$ ,  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения падающего электромагнитного излучения.

Многочисленные эксперименты с искусственно синтезированными порошками позволили установить связь между плотностью укладки и отношением  $M_0/M_{01}^2$ . Аппроксимация экспериментальных данных линейным уравнением

$$E = a \frac{M_0}{M_{01}^2} + b \quad (21)$$

дает значение коэффициентов "а" и "в" (см. таблицу 3).

Таблица 3.

№ п/п	Материал порошка	Значение коэффициентов "а"	Значение коэффициентов "в"
1.	Свинец	3,700	-3,900
2.	Медь /Набойченко/	2,100	-1,300
3.	Рис	0,899	-0,633
4.	Песок	0,700	0,300
5.	Поваренная соль	0,297	0,066
6.	Аминопласт	0,279	0,180

Используя каноническое уравнение для определения дисперсии в зависимости от начальных моментов первого и второго порядков, а

так же формулу (21), легко получить выражение

$$G = \sqrt{\frac{en^{3/4}}{\mu d} - b} - 1, \quad (22)$$

используя которое можно определить среднеквадратическое отклонение определяющего признака частиц анализируемого порошка.

Реализация двухканального измерительного преобразователя для контроля параметров распределения была осуществлена по схеме, представленной на Рис. 8

Пучок ионизирующего излучения от источника И формируется при помощи коллиматора 2 и попадает на поверхность контролируемого порошка I. Детектор Д<sub>1</sub> регистрирует прошедшее через слой порошка излучение, а детектор Д<sub>2</sub> - возбужденное в порошке вторичное излучение.

Первый канал измерительного преобразователя (источник излучения - детектор I) регистрирует поглощающую способность слоя порошка -  $en^{3/4}$ , а второй канал, согласно алгоритму (20), измеряет начальный момент первого порядка, который определяет математическое ожидание определяющего признака частиц анализируемого порошка.

Имея значение  $M_{\mu}$  для анализируемого порошка, нетрудно по формуле (22) вычислить величину G'. Таким образом нами решена задача определения параметров, характеризующих дисперсность порошков, подчиняющихся двухпараметрическим одномодальным законам распределения.

Многочисленные эксперименты, проведенные на реальных и искусственно синтезированных окисленных свинцовых порошках, позволили установить весьма тесную корреляционную связь между окисленностью и плотность укладки. Последнее позволило разработать измерительный преобразователь и на его основе прибор для измерения окисленности свинцовых порошков. Прибор имеет устройство для непрерывного отбора из потока материала пробы для анализа. Испытание прибора в производственных условиях показали хорошую сходимость и воспроизводи-

мость результатов измерения.

Анализ чувствительности измерительного преобразователя по каналам измерения показал, что оптимальная чувствительность первого канала измерения имеет место при толщине слоя поглотителя (порошка), определяемого из уравнения

$$d_{opt} = \frac{en \epsilon_2 / \epsilon_1}{\mu (\epsilon_2 - \epsilon_1)}, \quad (23)$$

где  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_1$  - граничные значения диапазона измеряемых величин,  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения.

Чувствительность второго канала измерения определяется формулой

$$|S|_2 = \frac{3\omega_0 b^4 \Omega_1}{8\pi R^2 (\Omega_2 + \Omega_3)^2} \left\{ \frac{1}{\Omega_4 + \Omega_5} \left( e^{-(\Omega_4 + \Omega_5)} - 1 \right) + 1 \right\}, \quad (24)$$

где  $\Omega_1$  - радиационное сопротивление слоя порошка падающему излучению по фотоэффекту,  $\Omega_2$  - радиационное сопротивление среднестатистической частицы порошка падающему излучению,  $\Omega_3$  - радиационное сопротивление среднестатистической частицы порошка вторичному излучению,  $\Omega_4$  - радиационное сопротивление слоя порошка падающему излучению,  $\Omega_5$  - радиационное сопротивление слоя порошка вторичному излучению.

Из анализа уравнения (24) следует, что с ростом энергии падающего излучения чувствительность второго канала измерения будет уменьшаться, в то время как чувствительность первого канала измерения имеет максимум при  $\mu d \epsilon = 1$ . Поэтому, при двухлучевой конструкции измерительного преобразователя, то есть когда используются два источника излучения, энергию следует выбирать для первого канала такой, чтобы выполнялось равенство  $\mu d \epsilon = 1$ , а для второго канала по возможности меньшей. Если же по каким-то соображениям, целесообраз-

но использование одного источника излучения, то энергию следует выбирать такой, чтобы обеспечивалось наибольшее значение чувствительности по обоим каналам измерения.

Анализ методических погрешностей дал возможность учесть все факторы, влияющие на погрешность измерения параметров распределения, и путем подбора энергии потока падающего излучения, особых условий формирования слоя порошка и конструктивных особенностей измерительного преобразователя свести погрешности к минимуму.

Лабораторные испытания прибора для контроля параметров распределения на порошках поваренной соли, риса, аминокласта показали хорошую сходимость результатов эксперимента. В таблице 4 приведены данные испытания прибора на порошках, полученных из размола риса.

Таблица 4.

№ п/п	Начальный момент по данным выборочного анализа $M_{н1}$ мкм	$M_{н2}$	Значение полученное измерением с учетом $W$	Погрешность измерения $M_{п1}$ %	$\sigma$ выбор. мкм	$\sigma$ эксп. мкм	Погрешность измерения	
							$\sigma$	%
1.	85,5	1,76	84,9	0,7	40,5	48	18,5	
2.	259,0	1,83	246,6	4,8	80,0	96	20,0	
3.	448,0	1,87	465,8	4,0	217,0	207	4,6	
4.	1110,0	1,93	1096,0	1,2	440,0	365	17,0	
5.	4040,0	1,99	4110,0	1,7	1310,0	1210	7,6	

Как видно из таблицы 4 погрешность определения начального момента первого порядка прибором по сравнению с выборочными данными, полученными микроскопическим методом, не превышает 5%, а погрешность измерения среднеквадратического отклонения не превышает 20%.

Проведенные нами производственные испытания прибора для определения окисленности свинцовых порошков на Подольском аккумуляторном заводе совместно с НИИХТИ г. Подольск, показали, что абсолютная погрешность измерения прибором окисленности не превышает 2,9%.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИСПЕРСНОГО АНАЛИЗА ПОРОШКОВ. С целью повышения быстродействия и точности анализа перед исследованиями фотоэлектрического метода была поставлена задача разработки комплексно автоматизированной системы измерения и обработки потока информации. Как известно, при анализе дисперсности порошков наиболее трудоемкими являются такие операции как диспергирование и приготовление препарата. С ними же связано наибольшее число искажающих факторов. Точность анализа дисперсного состава в значительной мере зависит от плотности посадки препарата на предметное стекло и эффективности процесса диспергирования. Поэтому в исследовании была поставлена задача разработки такого узла информационно-измерительной системы, который бы обеспечил подготовку пробы к анализу (разрушение агрегатов частиц) и упорядоченную подачу частиц порошка в зону измерения.

В диссертационной работе дан анализ связей между параметрами электрического сигнала и линейными размерами объекта при сканировании щелью. Получено соотношение между площадью пресекции объекта измерения на плоскость сканирования и площадью импульса на выходе сканирующего устройства в виде

$$S_4 = \frac{v_0 \ell}{c(1-v)} \int_0^{\tau} i(v_0 t) dt, \quad (25)$$

где  $S_4$  - площадь проекции частицы на плоскость сканирования,  $v$  - скорость сканирования,  $\ell$  - длина щели сканирования,  $\nu$  - оптический коэффициент объекта измерения,  $\tau$  - время сканирования объекта измерения.

Показано, что для сканирования "узкой" и "широкой" щелями соотношение между площадью проекции объекта измерения и площадью импульса остается тождественно. Приведен анализ погрешностей измерения линейных размеров частицы при сканировании щелью. Показано, что с уменьшением отношения размера объекта измерения в направлении сканирования к ширине щели снижается точность измерения площади проекции объекта. Экспериментальная проверка полученной зависимости показала хорошую сходимость расчетных значений с экспериментальными данными.

Разработано и проведено исследование отдельных функций устройства, выполняющего два важных этапа дисперсного анализа: этап подготовки пробы порошка к анализу и этап подачи частиц порошка в зону измерения.

Исследования процесса подачи частиц в зону измерения показали, что изменение в широких пределах параметров работы подающего устройства (избыточное давление воздуха в камере, напряженность электрического поля) не оказывает существенного влияния на измерение гранулометрического состава порошка, выводимого из подающего устройства.

Исследования динамики частиц в зоне сканирования показали, что наименьший разброс скорости частиц наблюдается при избыточном давлении в рабочей камере  $\Delta P = 150 \text{ Н/м}^2$  и напряженности электрического поля  $E = 4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$  ( $\bar{V} = 1,02 \text{ м/с}$ ;  $\sigma_V = 0,11 \text{ м/с}$ ;  $\delta_V = 10,5\%$ ).

Анализ влияния дефокусирования частиц на точность измерения их линейных размеров методом сканирования щелью позволил получить уравнение, описывающее соотношение площадей изображения шаровой частицы радиусом -  $r$ , сфокусированной и расфокусированной на глубине  $\Delta X$ .

$$\delta = \frac{r}{r + \frac{D \Delta X}{f(1-\beta)\Delta X} + \frac{D^2 \Delta X^2}{4f^2(1-\beta)^2 \Delta X^2}}, \quad (26)$$

где  $f$  - фокусное расстояние,  $D$  - диаметр линзы,  $\beta$  - линейное увеличение оптической системы.

Проведенный нами анализ влияния дефокусирования частицы на точность измерения ее линейных размеров показал, что если линейный размер частицы определяется по амплитуде сигнала, то для снижения погрешности измерения необходимо обеспечивать довольно жесткую фокусировку частиц. При нанесении частиц на предметное стекло и сканировании их со стекла наименьшая погрешность за счет дефокусирования возникает в том случае, когда изображение оптической системы наведено на наименьшую частицу анализируемой совокупности.

На основании анализа погрешностей пространственно-временного разрешения измерительного преобразователя показано, что параметры импульса на выходе ФЭУ будут соответствовать размерам частицы только в том случае, когда расстояние между краями двух ближайших проекций частиц будет больше, чем ширина щели. В противном случае эти частицы сформируют импульс, длительность которого не будет пропорциональна линейному размеру частицы. Коэффициент совпадения, показывающий долю частиц в объеме пробы, линейный размер которых будет измерен с погрешностью, можно определять по формуле

$$T = \left( A \int_0^{2r} e^{-\beta l} e^{-c l^2} dl \right) 100\% \quad (27)$$

где  $\beta, c$  - коэффициенты, зависящие от режима работы,  $l$  - расстояние между краями проекции частиц.

Для рекомендованного режима работы подающего устройства  $\beta = 0,014$ ,  $c = 0,00036$ , нормирующий множитель  $A = 0,0142$ .

Расчеты показывают, что для щели шириной 10 мкм и рекомендованного режима работы подающего устройства погрешность совпадения составит менее 1,4%.

Исследовано влияние неполного коэффициента пропускания \* на экранирование светового потока частицами различных порошков. Показано, что разброс значений неполного коэффициента пропускания для широкого диапазона размеров металлических частиц не превышает 3%, а для органических порошков - 4%. Значительное отклонение неполного коэффициента пропускания от среднего наблюдалось для частиц порошка, полученного дроблением кварцевого стекла (82%).

Проведенный нами анализ методических погрешностей измерения площади проекции частицы и ее эквивалентного диаметра дает следующие выражения

$$G[S_4] = \frac{2\gamma I_0 \beta V}{3Z_a E \ell h} \sqrt{d_a^2 + d_z^2 + d_v^2}, \quad (28)$$

$$G[d_3] = 0,5 \sqrt{\frac{2,17 I_0 \beta V}{Z_a E \ell h} (d_a^2 + d_z^2 + d_v^2)} \quad (29)$$

где  $\bar{E}$  - освещенность /лм·м<sup>-2</sup>,  $d_a; d_z; d_v$  - относительные среднеквадратические погрешности измерения амплитуды, длительности импульса, скорости сканирования, соответственно,  $Z_a$  - анодная чувствительность /А·лм<sup>-1</sup>,  $I_0$  - ток анода светоприемника при отсутствии объекта измерения,  $\beta$  - линейный размер частицы.

Анализ формул (28) и (29) показывает, что дисперсия измерения площади и эквивалентного диаметра незначительно зависит от

\* Под неполным коэффициентом пропускания понимается отношение светового потока, вышедшего из частицы в телесном угле  $\theta$ , к световому потоку, падающему на пограничную поверхность, обращенную к источнику света.

линейного размера микрообъекта, что согласуется с экспериментом. Расчеты  $G[d_3]$  по формуле (29) для  $V = 1$  м/сек,  $\bar{E} = 600$  лм·м<sup>-2</sup>,  $h = 10 \cdot 10^{-6}$  м и  $d_3 = 20+200$  мкм дают среднее значение  $G[d_3] = 4,1$  мкм. Полученное значение весьма близко к экспериментальному значению  $\bar{G} = 4,7$  мкм. Несколько завышенное значение  $\bar{G}$  по-видимому можно объяснить тем, что в эксперименте кроме методических погрешностей учтены и инструментальные.

Основные результаты работы состоят в следующем:

#### А. Теоретические

1. Впервые дано теоретическое описание процесса селекции заряженных микрочастиц в переменном электрическом поле высокой напряженности, что позволило разработать оригинальные электрогравитационные классификаторы микропорошков и предложить ряд новых методов анализа дисперсности порошков.

2. Проведены теоретические исследования процесса квантования выборочных статистик, что позволило предложить теорию, обосновывающую выбор оптимальной ширины дифференциального коридора конечного каскада автоматической системы анализа дисперсного состава порошков, обеспечивающей наилучшее приближение выборочных распределений к распределению генеральной совокупности.

3. Разработаны основы теории электрогравитационного метода анализа дисперсности порошков, основанного на зондировании потоком  $\beta$ -излучения аэрозольного облака, образуемого из частиц пробы порошка в переменном поле высокой напряженности. Показана возможность построения измерительного преобразователя и предложен метод расчета его основных параметров.

4. Исследован процесс взаимодействия электромагнитного (рентгеновского) излучения со слоем идеальной диэлектрической среды, установле-

на функциональная связь между величинами, характеризующими преобразование энергии падающего излучения и параметрами, описывающими дисперсность поглотителя.

5. Предложена теория статистической квазиэллипсоидности частиц порошков, использование основных положений которой дает возможность путем несложных расчетов получать статистические характеристики порошков и оценивать их физико-механические свойства.

Установлено, что среднегеометрический линейный размер частиц порошка, подчиняющегося свойству статистической квазиэллипсоидности, инвариантен положению частицы по отношению к направлению сканирования.

6. Предложен способ трансформации законов распределения размеров частиц порошка, обеспечивающий удовлетворительную сходимость с экспериментом для порошков, подчиняющихся свойству статистической квазиэллипсоидности.

#### Б. Практические

7. Разработаны технические средства для классификации порошков, у которых процесс разделения частиц по линейным размерам и вывод их за пределы активной зоны осуществляется только за счет сил, возникающих при взаимодействии заряженных частиц с электрическим полем.

8. Разработан способ дезагрегации частиц порошков в переменном электрическом поле, образуемом пластинами при малом межэлектродном расстоянии. Определены оптимальные параметры поля и размеры конденсатора, обеспечивающие наиболее эффективное разрушение агрегатов частиц пробы порошка.

9. Разработан прибор для бесконтактного контроля в потоке параметров распределения размеров частиц порошков, подчиняющихся

двухпараметрическим одномодальным законам. Лабораторные и промышленные испытания прибора показали удовлетворительную воспроизводимость результатов измерения с выборочными данными гранулометрического анализа, полученного микроскопическим методом.

10. Разработан измерительный преобразователь и прибор на его основе для контроля окисленности свинцовых порошков в процессе производства. Прибор прошел производственные испытания и длительную эксплуатацию, рекомендован к внедрению на заводах стартерных аккумуляторов.

11. Разработана система, позволяющая автоматизировать все основные операции анализа дисперсности порошков: подготовку пробы к измерениям, подачу в зону сканирования, измерение определяющего признака и обработку потока информации.

Система обладает достаточным быстродействием, работоспособностью и обеспечивает необходимую точность анализа.

12. Разработан прибор для контроля дисперсности порошков, основанный на зондировании излучением аэрозольного облака, образуемого пробой порошка в однородном переменном электрическом поле плоского конденсатора, что позволило значительно упростить процесс измерения определяющего признака, обработку информации и повысить надежность технического устройства, а так же достоверность дисперсного анализа.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Наремский Н.К. Эл тетрогравитационная классификация тонкодисперсных порошков по массе частиц. "Порошковая металлургия", 1977, № 12, с.17 + 21.

2. Наремский Н.К. Квантование гистрограмм при графическом

представления результатов дисперсного анализа. Научные труды. Исследование и расчет элеваторных сооружений", из-во "Колос" М., 1976 вып.2, с.97-107.

3. Наремский Н.К. Разрушение агрегатов частиц порошка воздействием переменного электрического поля. "Порошковая металлургия" 1977, № 9 (177), с.1-5.

4. Наремский Н.К. О представительности пробы при анализе дисперсного состава порошков. Сб. "Автоматизация технологических процессов". Изд-во ТПИ, АН СССР, Тула, 1973, вып.1, с.228-236.

5. Наремский Н.К., Недранец В.С. Об одном вопросе анализа гранулометрического состава тонкодисперсных сред. Теоретические основы химической технологии, АН СССР, т.УП, 1973, № 1, с.130-132.

6. Наремский Н.К., Недранец В.С., Гомолич В.Я. К решению параметрической задачи при анализе дисперсного состава твердой фазы аэрозоля. Сб. "Физика аэродисперсных систем", Киев, 1973, с.37-41.

7. Наремский Н.К., Гомолич В.Я. К анализу дисперсного состава сред по инвариантным свойствам проекции частиц. Труды по аэроионам и электроаэрозолям, т.У1, Тарту, 1973, с.177-184.

8. Наремский Н.К., Жихарев В.В. О точности измерения  $\chi$ -методом параметров сложных сред. Известия высших учебных заведений, Горный журнал, 1974, № II, стр.156-159.

9. Наремский Н.К., Недранец В.С. О поглощении света микро-частицами. Сб. "Физика аэродисперсных систем", вып. XI, "Вища школа", Киев, 1974, с.49-50.

10. Наремский Н.К., Гомолич В.Я., Шабаев А.Н. Классификация порошков в электрическом поле плоского конденсатора. "Порошковая металлургия", 1975, № 8, стр.10-13.

11. Наремский Н.К., Морозов Ю.А. Исследование возможности

контроля гранулометрического состава сыпучих материалов в потоке бесконтактным методом с целью создания датчика для системы контроля и автоматического регулирования процессов измельчения. Сб. "Кибернетика и автоматическое управление". Одесское отд., 1968, вып.2, с.124-128.

12. Наремский Н.К., Шабаев А.Н. Исследование возможностей люминесцентного метода для целей гранулометрии. Сб. "Хранение и переработка зерна", серия "Комбикормовая промышленность", М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1972, вып.1, с.10-14.

13. Наремский Н.К., Морозов Ю.А. К расчету чувствительности звена преобразования для контроля гранулометрического состава продукта размола зерна в потоке. Сб. "Хранение и переработка зерна", М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1970, вып.5, с.18-21.

14. Наремский Н.К., Морозов Ю.А. Объемная гранулометрия сыпучих сред в потоке. Сб. "Хранение и переработка зерна", М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1968, № 10, вып.10, с.15-22.

15. Наремский Н.К., Федоров Ф.А., Габучия В.Г. Применение электронной вычислительной техники для контроля и управления некоторыми процессами в пищевой промышленности. Сб. "Применение математических методов и вычислительной техники в системе хлебопродуктов", М., 1965, с.68-76.

16. Наремский Н.К., Шабаев А.Н. Определение статистических характеристик гранулометрического состава сыпучих сред. Сб. "Хранение и переработка зерна", серия мукомольно-крупяной промышленности, ЦНИИТЭИ, М., 1973, № 1, с.1-4.

17. Лукин А.А., Гомолич В.Г., Наремский Н.К. Влияние гранулометрического состава на плотность упаковки аэродисперсных систем. Сб. "Физика аэродисперсных систем", Изд-во "Высшая школа", вып.16, 1977, с.52-56.

18. Наремский Н.К., Каленов О.Е., Чернега А.А., Михайлов В.М., Недранец В.С. Метод определения степени модальности кривой распределения по плотности упаковки. Сб. "Физика аэродисперсных систем", вып.14, изд-во "Высшая школа", 1976, с.48-49.
19. Наремский Н.К., Шабаетв А.Н., Троян Н.А. Люминесцентная гранулометрия сыпучих материалов. Труды НИИ "Пищепромавтоматика", Одесса, 1972, вып.10, с.15-22.
20. Наремский Н.К., Гомолич В.Я., Унгур К.М. О разбиении на интервалы размаха совокупности размеров частиц при построении закона распределения порошковых и зернистых сред. Труды ВИПО "Пищепромавтоматика", Одесса, 1974, вып.12-13, с.170-175.
21. Наремский Н.К., Денисов В.А. Способ подготовки проб для исследования свойств порошков. Авт.свид.№ 603883 кл.С ОI. № 15/02 приоритет 3.07.75.
22. Кирвас А.В., Коновалов С.А., Монтик П.Н., Наремский Н.К. Аспирационный конденсатор. Авт.свид.№ 538314 23 мая 1975г.
23. Наремский Н.К., Проскурин В.Я. и др. Исследование работы электростатического дозатора тонкодисперсных порошков. Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих сред", Одесса, 1971, с.93-94.
24. Наремский Н.К., Морозов Ю.А. Исследование гранулометрического состава полидисперсных сред по поглощению тормозного излучения. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках, Одесса, 1967, с.14-15.
25. Наремский Н.К., Лукин А.А. и др. К анализу физико-механических свойств сыпучих сред радиоактивным методом. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках, Одесса, 1967, с.6-8.

26. Наремский Н.К., Гомолич В.Я., Недранец В.С. К автоматическому анализу дисперсного состава твердой фазы аэрозоля. Материалы II Всесоюзной конференции по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972. Материалы XI Всесоюзной конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных сред. Одесса, 1972, с.53.
27. Наремский Н.К., Лукин А.А., Гомолич В.Я. Зависимость плотности упаковки от статистических параметров сыпучей среды. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.36.
28. Наремский Н.К., Монтик П.Н., Лопманов В.И. Вопросы измерения линейных размеров тонкодисперсных порошков. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.82-83.
29. Наремский Н.К., Каленов О.Е., Недранец В.С. Исследование метода случайных хорд для бесконтактного исследования гранулометрического состава сыпучих материалов. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.85.
30. Наремский Н.К., Михарев В.В. Построение градуировочной кривой при помощи ЭВМ с целью уменьшения погрешности измерений. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.183.
31. Наремский Н.К., Песчаный Е.И. О контактном зарядении частиц. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1975, с.185.
32. Наремский Н.К., Песчаный Е.Ф., Тигарев А.М. Исследование формы грубодисперсного аэрозоля "Материалы физико-химической, промышленной и приборной секции III Всесоюзной конференции по аэрозо-

лям", Ереван, "Наука", 1977, с.176-177.

33. Наремский Н.К., Недранец В.С., Шабаев А.Н. К вопросу автоматического измерения и анализа тонкодисперсных сред. Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих сред", Одесса, 1971, с.140-141.

34. Наремский Н.К., Каленов О.С., Недранец В.С., Тигарев А.М. Автоматизация анализа гранулометрического состава сыпучих материалов. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Средства автоматизации и контроль процессов производства источников тока", Информэлектро, М., 1975, с.72-73.

35. Наремский Н.К., Лукин А.А., Гомолич В.Я. Способ определения дисперсного состава сыпучих материалов. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Средства автоматизации и контроль процессов производства источников тока", Информэлектро, М., 1975, с.60-61.

36. Наремский Н.К., Недранец В.С., Гомолич В.Я. Определение параметров универсальной формулы, применяемой для описания дисперсного состава сред. АН УССР, Республиканский фонд алгоритмов и программ, инв.№ 2244, 2245, 1972.

37. Наремский Н.К., Морозов Ю.А. и др. К исследованию экспрессных методов гранулометрического состава сыпучих сред и их вещественного состава в потоке. Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих сред", Одесса, 1971, с.140.

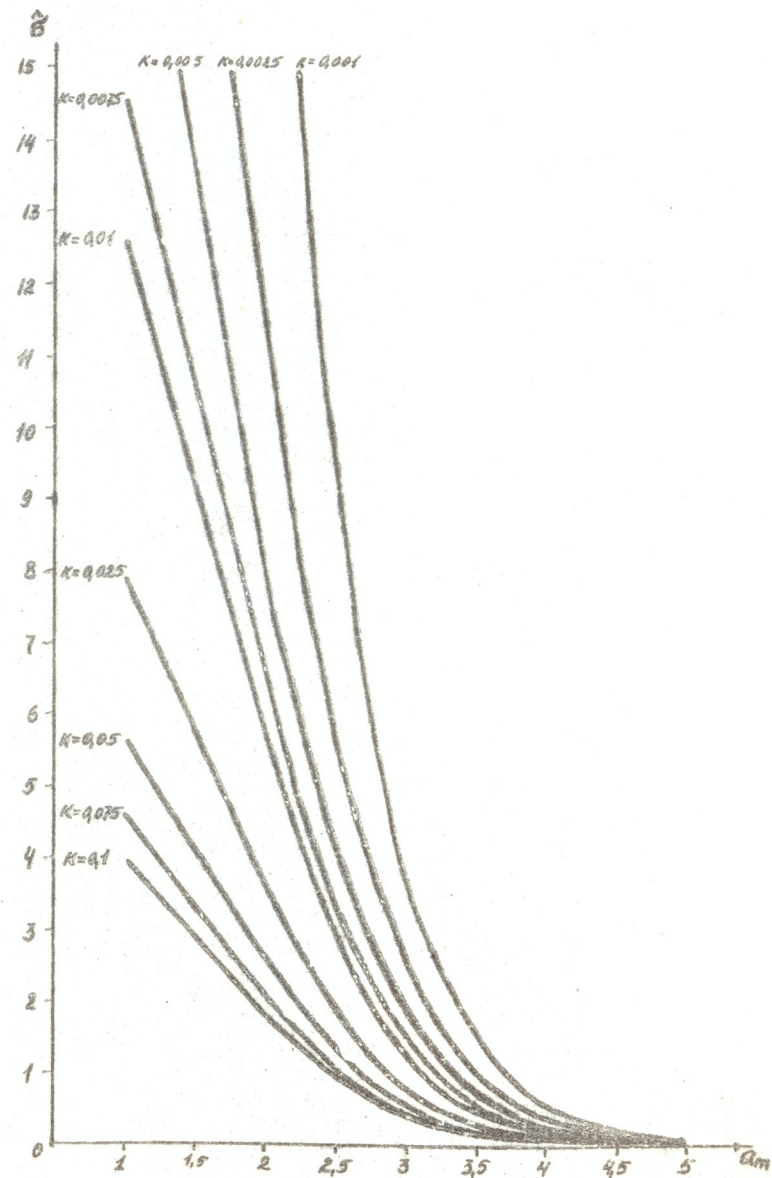


Рис. 1

Ил. 3

$\sigma = 10^{-4} \text{ м.}; E = 10^{10} \text{ дин/см.}; \rho = 2.85 \cdot 10^4 \text{ г/см.}^3;$   
 $f = 150 \text{ см.}; \omega = 944 \text{ рад/сек.}; V_0 = 0.274 \text{ м/сек.};$   
 $t_0 = 0.002 \cdot 10^{-2} \text{ сек.}; g = 0.52 \cdot 10^{-4} \text{ г.}; n = 0.49 \cdot 10^6 \text{ эл. зарядов.};$   
 $\sigma_{\text{max}} = \frac{A}{g} = \frac{0.342}{2.81} = 0.0349 \text{ сек} = 34.9 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}; \sigma_{\text{max}} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$

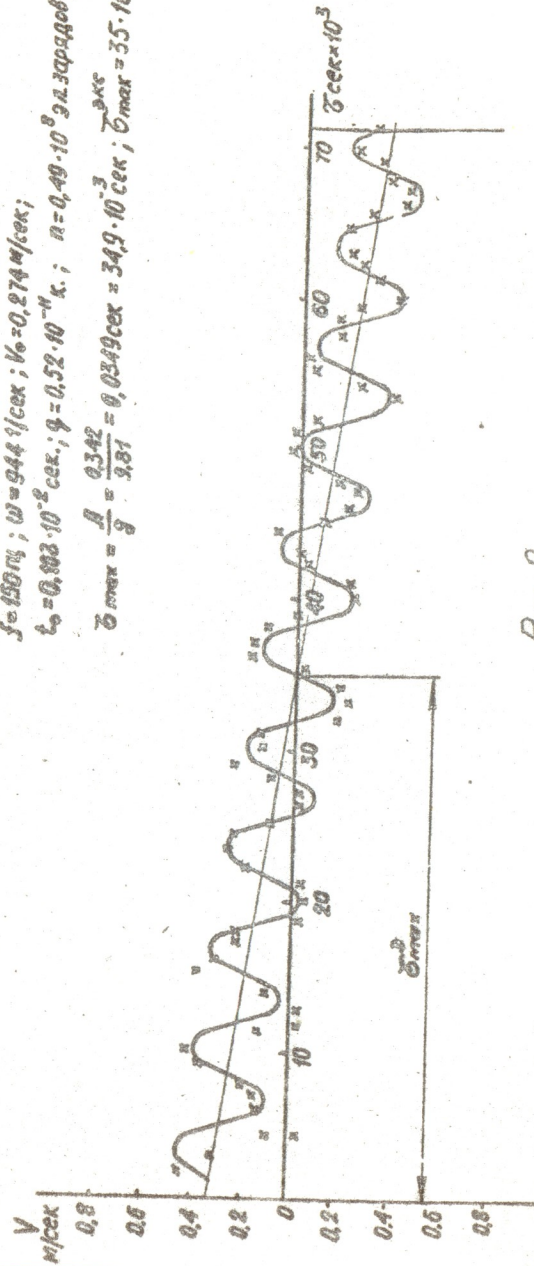


Рис. 2

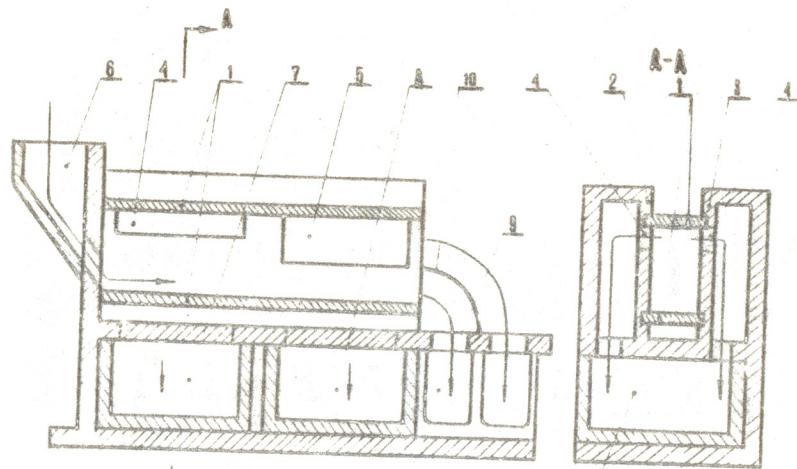


Рис. 3

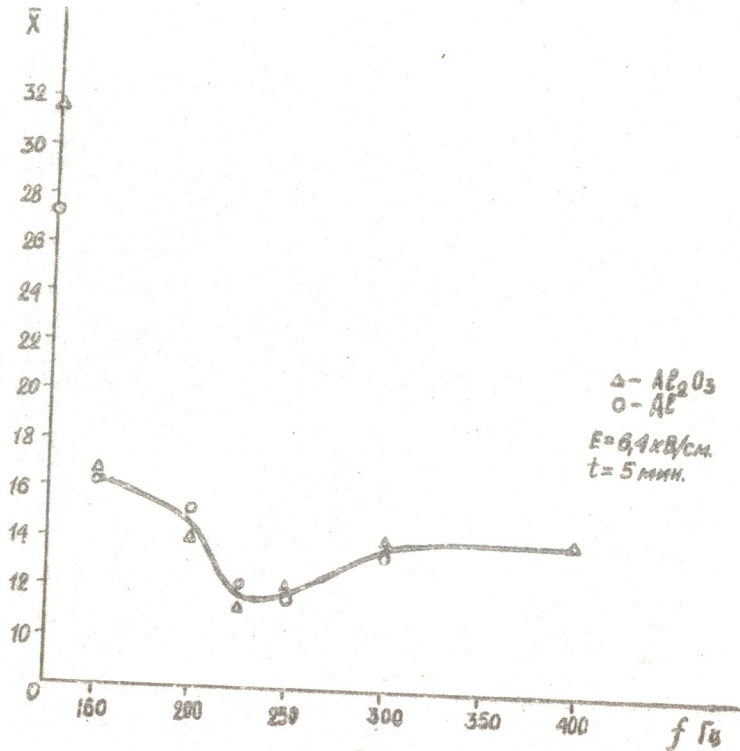


Рис. 5

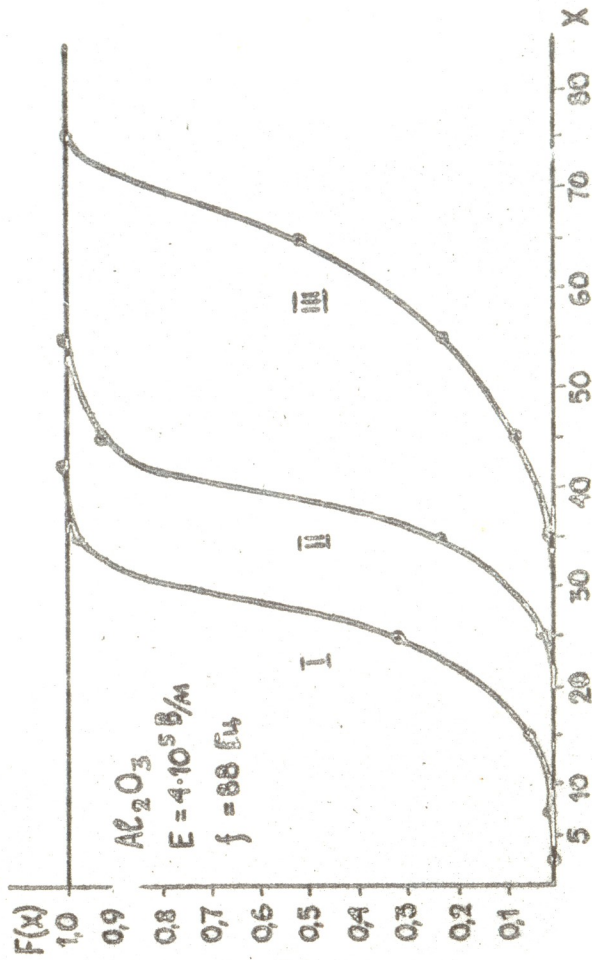


Рис. 4

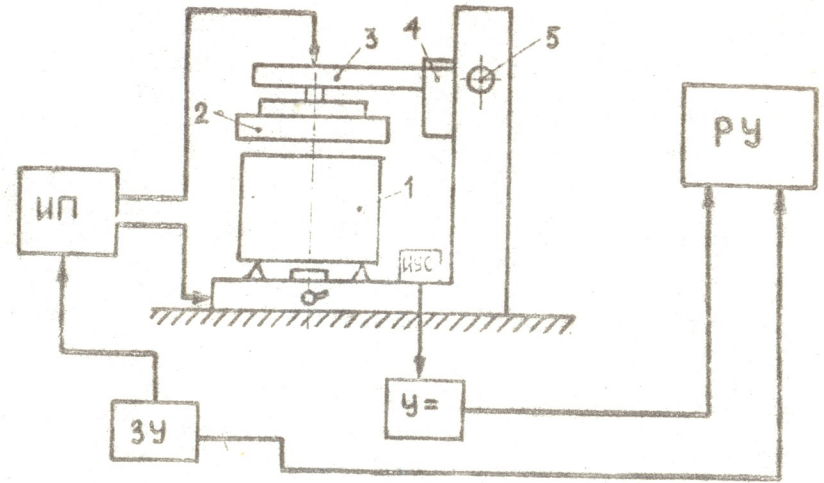


Рис. 6

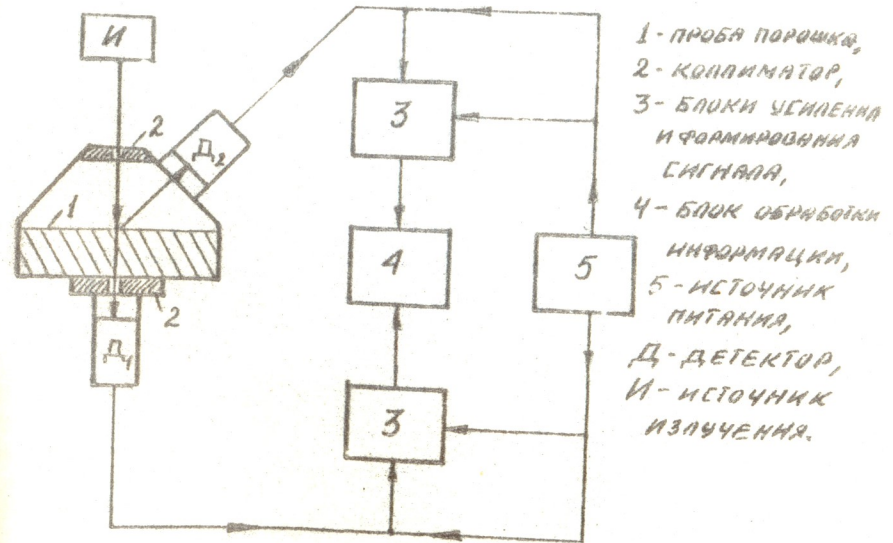


Рис. 8

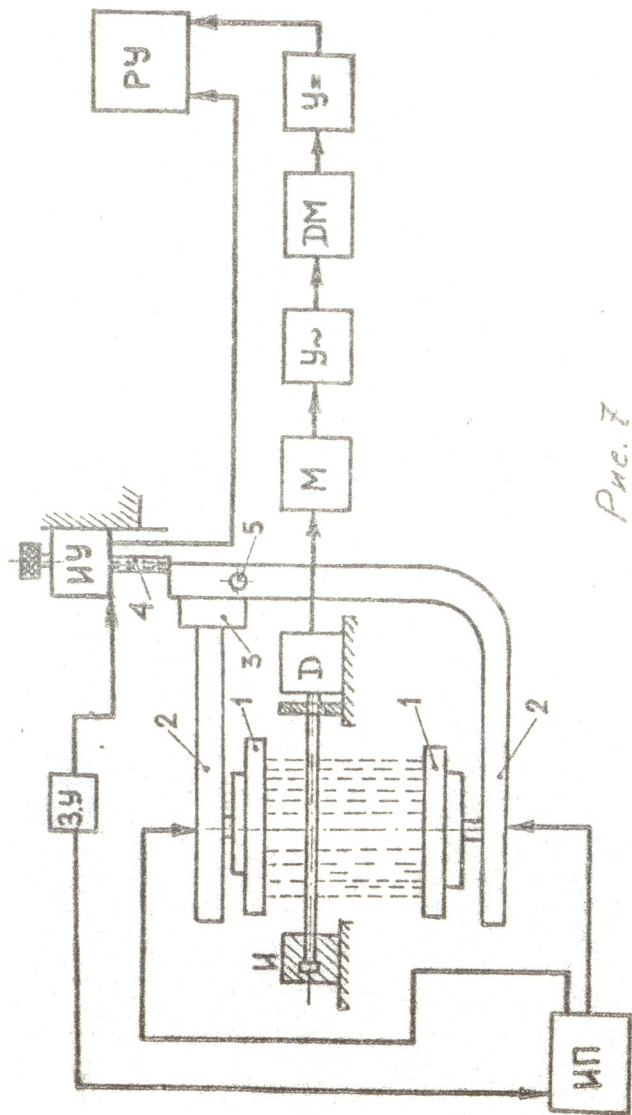


Рис. 7

БР 09037 Подп. к печати 08.06.78 г. Формат 60 x 84 I/I6  
Объем 2 п.л. Заказ № 2303. Тираж 130 экз.  
Гортипография Одесского облполиграфиздата, цех № 3.  
Ленина, 49