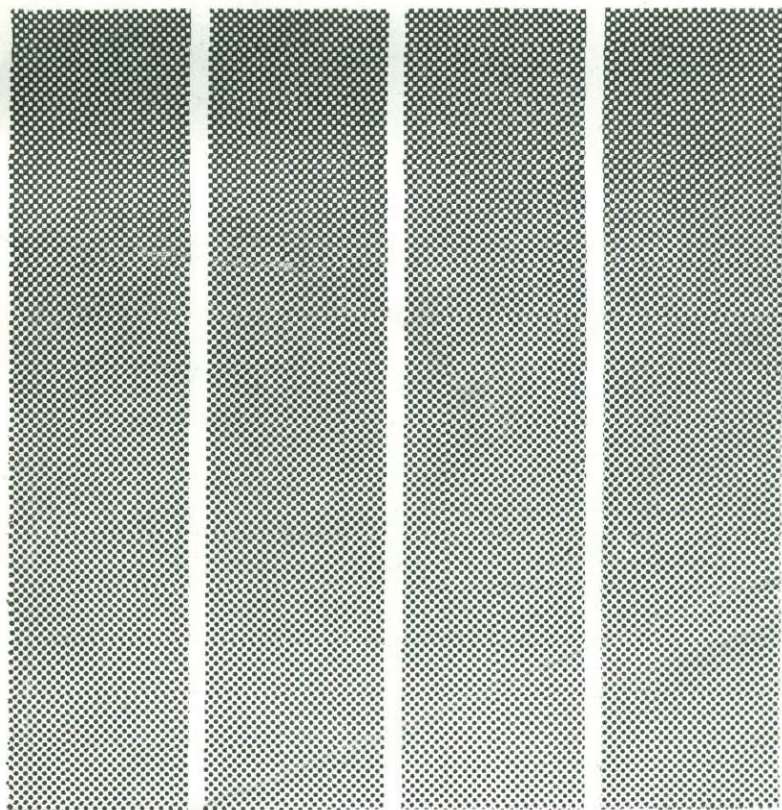


В. И. БЕЛОВ

ФЛЮИДИЗАЦИОННО-
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ
КЛАССИФИКАЦИЯ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ



В. И. БЕЛОВ

ФЛЮИДИЗАЦИОННО-
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ
КЛАССИФИКАЦИЯ
ТОНКОДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

2148



МОСКВА • „НЕДРА“ • 1977

Белов В. И. Флюидизационно-электростатическая классификация тонкодисперсных материалов. М., «Недра», 1977. 120. с.

В книге освещены вопросы теории и практики нового флюидизационно-электростатического метода классификации тонкодисперсных материалов, основанного на зарядании частиц при распылении в кипящем слое и последующем разделении их на фракции в фокусирующих электростатических полях сетчатых электродов. Указаны области применения этого метода (доводка до кондиций черновых концентратов, содержащих золото, олово, вольфрам и редкоземельные элементы; получение алмазных микропорошков и абразивов самых высоких марок; исследование частиц компонентов, загрязняющих окружающую воздушную и водную среду, с целью ее очистки). Описаны устройства флюидизационно-электростатических сепараторов.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, а также может быть полезна студентам вузов, занятых изучением и совершенствованием технологии получения тонкодисперсных материалов.

Табл. 18, ил. 55, список лит.— 103 назв.

Комплексное использование полезных ископаемых, повышенные требования к золотым, оловянным, вольфрамовым, редкоземельным и другим концентратам обусловили актуальность проблемы получения тонкодисперсных фракций однородного гранулометрического состава.

Точность классификации имеет особенно большое значение для алмазных и абразивных микропорошков, находящихся все более широкое применение в промышленности, при исследовании шламов различных минералов и изучении распределения по отдельным фракциям ценных компонентов при обогащении полезных ископаемых.

С развитием методов электронно-ионной технологии тонкодисперсные однородные порошки во всевозрастающем количестве применяются при нанесении на изделия полимерных и металлических покрытий, при напылении люминофоров, в плазменно-дуговой металлургии и др.

Современные методы классификации тонкодисперсных материалов включают грохочение, гравитационную классификацию в воздушной и жидкой средах, центробежную и электрическую (коронная, электростатическая и комбинированная) классификацию.

Грохочение обычно применяется для классификации материалов крупнее 40 мкм [1, 2] с эффективностью 50—60%. Применение воздушоструйных грохотов [3—5] позволяет увеличить производительность грохочения при эффективности 90—95% для зерен крупнее 20—30 мкм. По сравнению с вибрационным рассевом использование воздушно-ситового метода увеличивает на 20—25% срок службы просеивающей поверхности, уменьшает забивание ячеек сит и повышает содержание зерен основной фракции [5].

Наряду с воздушоструйными для классификации тонкодисперсных материалов применяют резонансные грохоты [6, 7], позволяющие получать фракции с зернами максимальным размером не более 20—30 мкм.

Материалы с частицами размером 20 мкм и выше можно подвергать грохочению обычными сухими методами. Для сит с ячейками размером 15 мкм и меньше сухое просеивание затруднительно, а в ряде случаев и практически неосуществимо. Не-

большое количество узкокласифицированного материала получают просеиванием через микросита, с помощью ультразвука [8, 9], в водных растворах поверхностно-активных веществ.

Быстрый износ сит, значительное распыление мелких фракций и загрязнение производственных помещений, ухудшающее условия труда, ограничивают применение грохочения. Наибольшее распространение получили гравитационные методы классификации.

Гравитационная классификация, основанная на использовании силы сопротивления жидкой или газообразной среды частицам материала, движущимся в ней под действием силы тяжести [10—12], осуществляется в классификаторах со свободным падением частиц и в противоточных [13, 14].

Простейшими гидравлическими классификаторами, со свободным падением классифицируемого материала, являются различные желоба для отмучивания [15] и отстойники [16]. Гидросепараторы, или чановые классификаторы, позволяют получать фракции порошков до 20 мкм. Другие типы классификаторов с механической разгрузкой крупного материала [17—19] пригодны только для частиц крупностью более 90—100 мкм.

Для получения фракций крупнее 10—14 мкм мелкодисперсные порошки чаще всего классифицируют в конусах [19]. Эффективность гидравлической классификации колеблется от 50 до 95%, причем для получения узких классов проводят многократную их перемешку.

Гравитационным методам классификации присущи и серьезные недостатки. Закон Стокса, лежащий в основе этих методов, справедлив лишь для сферических частиц при нестесненном падении их и для чисел Рейнольдса, меньших 0,1. Граничная крупность разделения не зависит однозначно от скорости падения, а определяется рядом факторов, в первую очередь нагрузкой классификатора и гранулометрическим составом исходного материала. Многие порошки невозможно классифицировать в водной среде вследствие их окисления или иного химического взаимодействия с водой. Методы гравитационной классификации требуют больших производственных площадей; при этом классификация протекает длительное время.

Воздушная классификация порошков под влиянием силы тяжести не получила распространения в результате недостаточно высокой селективности [20—22].

В настоящее время широко применяется центробежная классификация в гидро- и аэроциклонах [23, 24] и центрифугах [25, 26]. Обычно в гидроциклонах разделяются материалы мельче 150—200 мкм.

Аэроциклоны используют главным образом в качестве пылеотделителей. Для выделения фракций порошков мельче 10 мкм следует применять циклоны малого диаметра. Нижний предел крупности для больших аэроциклонов составляет 30—60 мкм.

Более тонкое разделение достигается с помощью центрифуг [27—29]. В последнее время для обогащения микропорошков применяют различные типы спиральных воздушных обеспыливателей [30—32].

Для небольших количеств узкоклассифицированного мелкодисперсного материала предложено центробежно-адгезионное устройство [33], которое позволяет получать фракции микропорошков мельче 50 мкм.

Большая часть рассмотренных классификаторов не обеспечивает необходимой для ряда отраслей промышленности чистоты продуктов классификации. При этом некоторые из них имеют небольшую производительность.

Электрическая классификация, использующая силы взаимодействия электрического поля и электрических зарядов, обладает рядом преимуществ по сравнению с механическими методами классификации, главными из которых являются: универсальность, возможность тонкого регулирования и автоматизации, непосредственное воздействие без промежуточных преобразований электрической энергии на классифицируемые материалы.

Электрическая классификация в зависимости от способов зарядки частиц обрабатываемых материалов и действующих на них сил разделяется на электростатическую, коронную и комбинированную [34].

В электростатических классификаторах [35, 36] диспергированные материалы разделяются на отдельные фракции под действием кулоновской силы электростатического поля, силы тяжести и силы сопротивления среды. В простейшем электростатическом классификаторе используется однородное электрическое поле плоского конденсатора. В усовершенствованных электростатических классификаторах можно разделять порошковые материалы на фракции от 0,01 до 10 мкм и больше. Недостатками этого классификатора являются незначительная производительность и сложность устройства (разделение осуществляется в вакууме).

Помимо электростатических классификаторов с неподвижной рабочей средой для разделения на фракции тонкодисперсных материалов используют электроклассификаторы, основанные на осаждении частиц из ламинарного воздушного потока [37]. Электростатический классификатор данного типа пригоден для гранулометрического анализа аэрозолей и получения небольших количеств узкоклассифицированного порошкового материала.

Более перспективной является коронная электрическая классификация [34, 35, 38, 39—41], основанная на физических явлениях, происходящих в газах, находящихся под воздействием сильного электрического поля, создаваемого между электродами определенной конфигурации [38]. Частицы классифицируемого материала приобретают в межэлектродном пространстве униполярный электрический заряд и под действием внешнего элект-

рического поля движутся к осадительному электроду, осаждаваясь на нем.

Коронные классификаторы для пылевидных материалов выполняются камерными (с верхней и нижней подачей) [34] и трубчатыми [40, 41].

Для повышения эффективности разделения тонкодисперсных материалов на узкие фракции классификацию осуществляют в электрическом поле с переменным градиентом по длине рабочей зоны трубчатого коронного классификатора [40].

В коронных классификаторах получают мелкие и тонкие фракции с некоторым разбросом частиц по размеру, так как эффективность классификации во многом зависит от формы и размеров частиц. Коронные классификаторы пригодны для выделения в мелкую фракцию частиц размером мельче 40 мкм при большой производительности.

Трибоадгезионная классификация [42], основанная на использовании сил сцепления (молекулярные, электростатические и др.), центробежной силы и силы тяжести, позволяет разделять на фракции различные тонкоизмельченные сыпучие материалы. Проведенными исследованиями [43] установлена возможность применения трибоадгезионной сепарации для обеспыливания и классификации различных тонкодисперсных материалов. При этом можно получать фракции крупностью 0—20; 20—40; 40—70 мкм и больше [44]. Для классификации тонкодисперсных материалов разработан дисковый электроразделитель [45], на котором выделяют фракцию 0—10 мкм с незначительным количеством частиц крупнее 60 мкм, расходующий на 1 т около 1,5 кВт·ч электроэнергии. Недостатки разделителя—значительные габариты и сложность эксплуатации, обусловленная большим числом вращающихся деталей.

Коронный барабанный электросепаратор [34] позволяет классифицировать материал крупностью 0—4 мм. На этих сепараторах фракция менее 70 мкм извлекается на 99%. Классификация тонкодисперсных материалов на барабанных сепараторах происходит менее эффективно, чем на камерных.

Классифицировать тонкоизмельченные материалы, например цемент, на фракции менее 60—80 мкм можно в электрическом поле коронного разряда на электрических сепараторах с сетчатыми осадительными электродами [46, 47], которые успешно прошли заводские испытания. Производительность промышленного сепаратора этого типа несколько тонн в час.

Четко разделяются тонкодисперсные порошки на отдельные фракции в коронном классификаторе, в котором создается воздушный поток в виде струи с продольной составляющей скоростью, быстро уменьшающейся по мере продвижения частиц вдоль оси рабочей камеры [48]. На классификаторе разделяется на фракции с частицами размером до 10 мкм порошок графита.

Перспективна классификация тонкодисперсного материала (на фракции крупностью от нескольких микрон до десятков микрон) под действием электростатического поля и механической вибрации сетчатых электродов [49]. Применение электрического поля повышает производительность процесса в 2—3 раза.

Говоря о тенденциях развития электрической классификации, необходимо отметить все возрастающую прецизионность ее методов. Если до последних лет размеры частиц обрабатываемых материалов составляли сотни микрон, то сейчас в практику входит электрическая классификация дисперсных материалов с частицами размером порядка нескольких микрон и меньше различной геометрической формы.

Идея воздействия на классифицируемые частицы фокусирующими электростатическими полями, широко используемыми в электронной оптике, в ускорителях элементарных частиц и другой аппаратуре ядерной физики, привела к созданию флюидизационно-электростатического метода классификации тонкодисперсных сыпучих материалов [50, 51]. Этот метод основан на использовании механической вибрации и кипящего слоя для распыления (флюидизации), заряжения исходных материалов и ускоряющих электростатических полей, создаваемых системой фокусирующих сетчатых электродов, для точной классификации микропорошков.

Флюидизационно-электростатический метод классификации, предложенный в 1963 г. автором и коллективом сотрудников, позволяет получать фракции крупностью от нескольких микрон до 100 мкм, не содержащих частиц, превышающих заданные размеры. Теоретическая разработка и практическое исследование этого метода позволили обосновать основные операции процесса и выбрать оптимальные технологические режимы.

В процессе разработки флюидизационно-электростатического метода классификации теоретические и экспериментальные исследования проводились по нескольким направлениям. Большое внимание уделялось изучению закономерностей движения потоков униполярно заряженных частиц в электростатических полях, создаваемых сетчатыми электродами, и методов управления их движением.

Фокусирующий эффект электростатического поля в значительной мере определяется соотношением напряженностей поля по обеим сторонам сетчатого электрода, размером ячеек сетки и толщиной образующих сетку прутков, а также величиной поданного на сетчатый электрод потенциала. Выбирая соответствующие значения этих параметров, можно в широких пределах менять характер движения частиц классифицируемых материалов, тем самым интенсифицируя процесс электроклассификации.

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность классификации тонкодисперсных материалов, является электрический заряд частиц. Правильный выбор способа сообщения ча-

стицам заряда с учетом электрофизических и физико-механических характеристик классифицируемых материалов, их гранулометрического состава, состояния поверхности и геометрической формы частиц, а также параметров внешней среды обеспечивает успешное применение флюидизационно-электростатического метода классификации для разделения по крупности различных порошковых материалов.

Классификация тонкодисперсных материалов в фокусирующих электростатических полях возможна лишь при подаче их в поле в виде полностью дезагрегированных зерен. Распыление порошков усложняется при размерах частиц меньше 20 мкм, так как в этом случае резко усиливается их слипаемость, и частицы многих материалов образуют устойчивые конгломераты, для разрушения которых необходима значительная энергия. Слипаемость микропорошков можно уменьшить реагентной обработкой, нагревом и другими способами внешнего физико-химического воздействия. Изучение различных способов флюидизации (основанных на применении звуковых, ультразвуковых колебаний и др.) показало, что эффективное распыление микропорошков достигается путем перевода их в аэрозольную фазу воздействием ультразвукового поля и с помощью кипящего слоя.

Флюидизацию тонкодисперсных материалов в ряде случаев следует совмещать с предварительной классификацией исходного материала, обогащая переводимый в аэрозольную фазу порошок определенной фракцией. Достигается это выбором соответствующей скорости газа в камере кипения.

На флюидизационно-электростатических классификаторах эффективно разделяются на узкие фракции разнообразные диэлектрические, полупроводящие и проводящие материалы крупностью до 100 мкм. При этом в продуктах классификации отсутствуют частицы крупнее заданного размера. Эти классификаторы отличаются компактностью, экономичностью, отсутствием пылевыделения в процессе эксплуатации, простотой настройки и управления, электробезопасностью.

Анализ оригинальных работ в области заряжания частиц микронных размеров и их движения в фокусирующих электростатических полях сетчатых электродов позволил осветить современное состояние флюидизационно-электростатического метода классификации, приоритет в разработке которого принадлежит СССР [51].

Дальнейшее совершенствование флюидизационно-электростатического классификатора позволит расширить область его применения как в обогащении полезных ископаемых, так и в других отраслях народного хозяйства.

Автор выражает благодарность инженерам В. А. Леонову, А. Г. Токареву, В. И. Корякову и Д. Н. Лежнину за предоставленные материалы и полезные советы.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ФЛЮИДИЗАЦИОННО-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ
КЛАССИФИКАЦИИ**

*1. Расчет фокусирующего эффекта
сетчатых электродов*

Управление движением в воздухе заряженных макрочастиц размером 1—1000 мкм сильными электростатическими полями имеет большой практический интерес и находит все более широкое применение в технике при разработке процессов электронно-ионной технологии.

Электронно-оптические эффекты при атмосферном давлении рассмотрены в работах Г. В. Спивака и Р. А. Лукацкой [52], которые показали возможность фокусировки электронов и ионов в воздухе при атмосферном давлении. Фокусировка макрочастиц в сильных электростатических полях при атмосферном давлении изучалась П. Ф. Крамаренко [53]. Эксперименты проводились на установке, состоящей из плоского конденсатора, между обкладками которого располагался фокусирующий электрод в виде цилиндра или диафрагмы. На нижний электрод помещались частицы различных материалов (угля, алюминия, железа, стекла, мрамора). Под действием электростатического поля частицы отрывались от нижнего электрода, пролетали через фокусирующий электрод и осаждались на подложке, закрепленной на верхнем электроде установки.

П. Ф. Крамаренко установил, что фокусирующее действие такой системы электродов прямо пропорционально высоте фокусирующего электрода, обратно пропорционально внутреннему диаметру его, а также диаметру верхнего электрода. Наибольшее влияние на фокусировку оказывают края электродов, т. е. области наибольшей неоднородности поля. В случае использования диафрагмы установлено, что фокусировка улучшается с уменьшением отверстия диафрагмы.

К сожалению, в работах П. Ф. Крамаренко отсутствуют методы расчета фокусирующих систем для заряженных макрочастиц, движущихся в воздухе, а также не рассмотрен случай, когда направление движения частиц совпадает с направлением действия силы тяжести.

Рядом авторов [54] исследовалось также управление движением заряженных частиц в сильных электрических полях и возможность использования их для получения структурных покрытий.

В работах Н. И. Штепы [55, 56] изучена фокусировка электростатическими осесимметричными и плоскими полями электризованных частиц, движущихся в вакууме или в вязкой среде в свободной от пространственного заряда области.

Значительный интерес представляет исследование возможности применения фокусирующих электростатических полей для классификации тонкодисперсных материалов, в частности полей, создаваемых сетчатыми электродами.

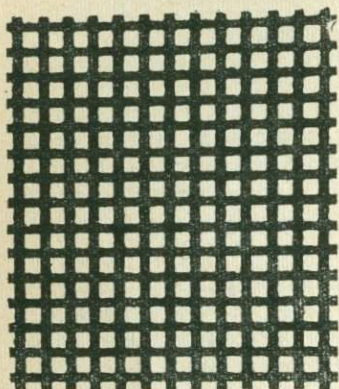


Рис. 1. Общий вид сетчатого электрода ($\times 200$)

В настоящее время промышленность ряда стран выпускает мелкоструктурные сетки с квадратными ячейками размером от нескольких микрон до 1 мм. Разброс размеров ячеек у таких сеток не превышает 1—2 мкм (рис. 1). Площадь свободного сечения (прозрачность) сеток в зависимости от размеров ячеек составляет от 2 до 60% [8, 57].

Первые сведения о мелкоструктурных сетках появились в 1958 г. Изготавливают их сочетанием методов фотографирования и гальванопластики. На стеклянной подложке, покрытой слоем воска, специальной делительной машиной наносят рисунок ячеек (размер ячеек зависит от ширины отверстий требуемого сита). На 1 мм может быть нанесено до 320 линий. Стеклянную подложку протравливают, и полученные канавки заполняют черной краской. С этой подложки печатают рисунок сетки на покрытую никелем медную пластину с предварительно нанесенным слоем светочувствительного материала. В результате при проявлении получается матрица с рисунком сетки. Матрицу помещают в никелевый электролит и наращивают слой никеля толщиной 3 мкм. Затем матрицу укрепляют на опорной пластине толщиной 30 мкм, на которой путем травления получают требуемый рисунок отверстий.

Сетки с ячейками 5, 10 и 20 мкм изготавливают из первоначальной матрицы с ячейками размером 30 мкм. Размер полотна сетки обычно не превышает 20×20 см², отверстия имеют строго квадратную форму. Выпускаемые в США сита имеют прозрачность от 1,2% (при ячейках размером 5 мкм) до 44% (при ячейках размером 90 мкм). Таким же путем изготавливают мелкоструктурные сетки в Нидерландах. Однако в отличие от американских полотен нидерландские сетки выполняются с круглыми коническими отверстиями и меньшей прозрачности (2,5% при ячейках размером 15 мкм и 15% при ячейках размером 40 мкм). Благодаря конической форме отверстий заби-

ваемость их частицами классифицируемого материала минимальна. По аналогичной технологии изготавливаются мелкоструктурные сетки и в нашей стране. Они формируются из медной основы, покрываемой затем для прочности слоем никеля. В поперечном сечении прутки сетки имеют круглую форму.

Точно рассчитать конфигурацию электростатического поля, создаваемого такими мелкоструктурными сетками с квадратными ячейками, для наших условий не представляется возможным. В работе [58] приближенно рассчитано электростатическое поле для сетки из тонких пересекающихся цилиндров. При решении этой задачи прутки сетки заменялись нитями, расположенными по оси прутков. Затем составлялось интегральное уравнение для плотности заряда на нитях из условия постоянства потенциала. Плотность заряда разлагалась в ряд Фурье, для коэффициентов которого получена регулярная бесконечная система уравнений, решаемая методом редукции.

Для рассмотренных тонких прутков $\frac{d}{b} \ll 1$, где d — диаметр прутка, b — размер просвета ячейки сетки; эквипотенциальная поверхность полученного приближенного решения почти везде совпадает с поверхностью прутков сетки, отходя вблизи узлов от поверхности на $0,2d$.

Электростатическое поле, создаваемое системой сеток с квадратными ячейками, точно рассчитать невозможно для тех размеров прутков и отверстий, которые применяются обычно при классификации микропорошков. Поэтому для выяснения фокусирующего действия такого поля был выбран приближенный метод расчета с последующей экспериментальной проверкой.

Частицы классифицируемого материала принимались при расчете однородными, изотропными, сферической формы, несущими постоянный во времени электрический заряд. Вследствие малых размеров частиц изменение электростатического поля на протяжении частицы не принималось во внимание, так же как и взаимодействие частиц друг с другом и искажение внешнего поля электрическими зарядами частиц.

Частица с зарядом q в фокусирующем электростатическом поле E в воздухе испытывает действие кулоновской силы F_k , поляризационной силы F_n , силы тяжести F_T и силы сопротивления среды F_c

$$\left. \begin{aligned} F_k &= qE \\ F_n &= \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} r^3 (E \nabla) E \\ F_T &= mg \\ F_c &= 6\pi\eta r v \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость частицы; r — радиус частицы; ∇ — дифференциальный оператор

Гамильтона; m — масса частицы; g — ускорение свободного падения; μ — динамический коэффициент вязкости; v — скорость движения частицы.

Определим влияние каждой из действующих сил на фокусировку частиц в электростатическом поле. Следует прежде всего выделить предельные случаи, когда фокусировка частиц определяется кулоновской F_k либо поляризационной F_p силой.

Принимая заряд частиц пропорциональным квадрату ее радиуса, можно записать предельную фокусировку в виде [55]

$$r_{\text{пр}} \begin{cases} \ll \\ \gg \end{cases} \sqrt{\frac{A_1(\epsilon + 2)\Phi''}{(\epsilon - 1)(\Phi''^2 - 2\Phi'\Phi''')}} \quad (2)$$

где A_1 — коэффициент; $\Phi = \Phi(z)$ — распределение потенциала вдоль оси симметрии; Φ' , Φ'' и Φ''' — соответственно первая, вторая и третья производные по z .

Верхний знак относится к предельному случаю, когда фокусировка частиц осуществляется под действием только радиальной составляющей кулоновской силы, а нижний — к фокусирующему действию радиальной составляющей поляризационной силы.

Выражение (2) включает некоторый характеристический радиус, определяющий вид фокусировки. Частицы размером, значительно меньшим характеристического, в фокусирующих электростатических полях изменяют свою траекторию в результате кулоновского взаимодействия заряда и поля, а для частиц размером, значительно большим характеристического, фокусировка имеет поляризационную природу.

Так, в электростатическом поле $(\Phi'' - \frac{2\Phi' - \Phi'''}{\Phi''}) \approx 10^4$ кВ/м² траектории частиц плотностью примерно 3000 кг/м³ и размером, меньшим 100 мкм, определяются главным образом силой кулоновского взаимодействия.

Для оценки влияния силы тяжести рассмотрим движение частицы с учетом сопротивления среды при условии, что на частицу действует сила электростатического поля, или сила тяжести. Используя выражение (1), можно определить соотношение между соответствующими установившимися скоростями движения частицы

$$v_a = \frac{qE}{6\pi\mu r},$$

$$v_T = \frac{2r^2\gamma g}{9\mu},$$

где v_a — установившаяся скорость движения частицы при действии сил F_k и F_c ; v_T — установившаяся скорость движения при действии сил F_T и F_c .

Для частиц радиусом 10—15 мкм и плотностью 2500—4000 кг/м³ v_T составляет 0,7—2,7 см/с. Скорость v_K такой же величины частица приобретает при небольшой напряженности электростатического поля (примерно 10⁵ В/м). Поэтому результирующая скорость будет в равной мере определяться как v_K , так и v_T .

В более сильных полях влияние силы тяжести на величину и направление результирующей скорости уменьшается. Начиная с напряженности примерно 10⁶ В/м при расчете траекторий движения частиц в электростатических полях действием силы тяжести можно пренебречь. Сопротивление среды в стоксовском интервале скоростей влияет лишь на величину скорости движения частицы, но не изменяет ее траектории.

С достаточным приближением ячейки мелкоструктурной сетки можно рассматривать как круглые диафрагмы. Электрические поля с симметрией вращения применяются для получения правильных электронно-оптических изображений в случае параксиальных потоков частиц [59]. Несмотря на это ограничение, воспользуемся некоторыми формулами для электростатических полей с вращательной симметрией, учитывая при этом, что вместо точечного изображения в фокусе будет пучок частиц некоторого диаметра.

Электростатическое поле на расстоянии от сетки, превышающем (2—3) b , практически однородно, и эквипотенциали представляют собой плоскости, параллельные сетке. Рассмотрим поэтому систему из двух плоских электродов с диафрагмой между ними (рис. 2). Действие диафрагмы будет собирающим, если ее потенциал отрицателен по отношению к окружающим точкам пространства.

Фокусное расстояние (в м) диафрагмы с круглым отверстием можно определить по формуле [60]

$$f = \frac{4\Phi(0)}{E_1 - E_2}, \quad (3)$$

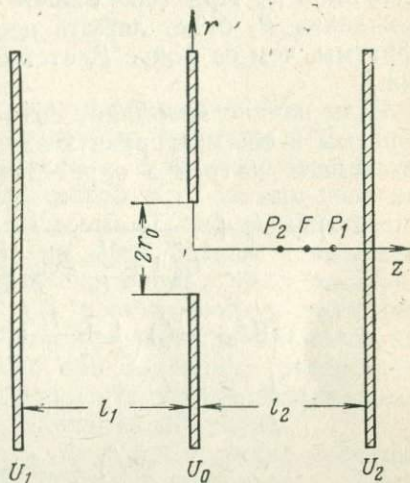


Рис. 2. Система из двух плоских электродов с диафрагмой между ними:

U_1 , U_2 и U_0 — потенциалы соответственно первого, второго электродов и диафрагмы; r_0 — радиус отверстия диафрагмы

где $\Phi(0)$ — значение потенциала в центре отверстия диафрагмы, В; E_1 и E_2 — напряженность поля по обе стороны диафрагмы, В/м.

Эта формула справедлива, если фокусное расстояние в несколько раз больше диаметра отверстия диафрагмы. Вследствие однородности полей E_1 и E_2 изменятся горизонтальная составляющая скорости частицы. Если поле E_2 ускоряющее, то частицы пересекут ось диафрагмы несколько дальше расстояния f (точка P_1). При тормозящем поле E_2 действительная точка схождения P_2 будет лежать несколько ближе к плоскости диафрагмы, чем ее фокус F , отстоящий от диафрагмы на расстоянии f .

Если начало координат совместить с центром отверстия диафрагмы и ось z направить вдоль оси симметрии, то значение потенциала на оси z определится выражением [60]

$$\Phi(z) = U_c + \frac{1}{l_1 \left(1 + \frac{l_2}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_2}{r_0}\right) + l_2 \left(1 + \frac{l_1}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_1}{r_0}\right)} \times \\ \times \left\{ (U_c - U_1) \left(1 + \frac{l_1}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_1}{r_0}\right) - (U_c - U_2) \left(1 + \frac{l_2}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_2}{r_0}\right) \right\} z + [(U_2 - U_c) l_1 + (U_1 - U_c) l_2] \times \\ \times \left(1 + \frac{z}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{z}{r_0}\right), \quad (4)$$

где U_c — потенциал диафрагмы (сетки), В; l_1 и l_2 — расстояние между электродами и диафрагмой, м; r_0 — радиус отверстия диафрагмы, м; U_1 и U_2 — потенциалы плоских электродов, между которыми расположена диафрагма, В.

Приняв $z=0$, можно получить формулу для определения $\Phi(0)$

$$\Phi(0) = U_c + \frac{(U_2 - U_c) l_1 + (U_1 - U_c) l_2}{l_1 \left(1 + \frac{l_2}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_2}{r_0}\right) + l_2 \left(1 + \frac{l_1}{r_0} \operatorname{arctg} \frac{l_1}{r_0}\right)}. \quad (5)$$

После преобразований формула (5) примет вид

$$\Phi(0) = U_c + \frac{(E_2 - E_1) r_0}{\left(\frac{r_0}{l_2} + \operatorname{arctg} \frac{l_2}{r_0}\right) + \left(\frac{r_0}{l_1} + \operatorname{arctg} \frac{l_1}{r_0}\right)}, \quad (6)$$

где

$$E_1 = \frac{U_c - U_1}{l_1}, \\ E_2 = \frac{U_2 - U_c}{l_2}.$$

Знаменатель в формуле (6) примерно равен π при различных расстояниях l_1 и l_2 .

Тогда

$$\Phi(0) = U_c + \frac{(E_2 - E_1) r_0}{\pi}$$

Подставив значение $\Phi(0)$ в формулу (3), получим следующее выражение для фокусного расстояния диафрагмы:

$$f = 4 \left(\frac{U_c}{E_1 - E_2} - \frac{r_0}{\pi} \right). \quad (7)$$

Фокусное расстояние пространства изображений (за сеткой) считается отрицательным, что и следует из формулы (7).

При равенстве полей E_1 и E_2 $f \rightarrow \infty$, т. е. фокусирующий эффект отсутствует. Если поле перед сеткой (E_1) больше поля за сеткой (E_2), то, как следует из формулы (7), сетка будет действовать как рассеивающая система. Чем больше отношение E_2/E_1 , тем сильнее проявляется фокусирующий эффект электростатического поля. По формуле (7) рассчитывалась величина фокусного расстояния при различных значениях потенциалов на электродах и диафрагме, а также при различных отверстиях диафрагмы. Максимальная напряженность электростатического поля в воздухе ограничивалась величиной 30 кВ/см.

Расчетные данные показывают, что фокусирующие свойства диафрагмы улучшаются при уменьшении ее потенциала. Влияние потенциала диафрагмы на величину фокусного расстояния уменьшается при $U_c < 100$ В, особенно при отверстии диафрагмы, превышающем 0,05 см. При $E_1 \ll E_2$ фокусное расстояние в незначительной степени зависит от потенциала первого электрода. Фокусное расстояние изменяется резко, когда величина E_1 составляет 20% и более величины E_2 (т. е. когда отношение E_1/E_2 меньше 0,2). Увеличение диаметра отверстия диафрагмы приводит к росту фокусного расстояния.

Движение заряженных частиц микронных размеров в воздушной среде в электростатических полях имеет ряд особенностей по сравнению с движением ионов. Для выявления этих особенностей рассчитывалась скорость движения частиц различных размеров, имеющих разную плотность. Так как вдали от сетчатых электродов напряженность поля меняется незначительно, предполагается, что частицы движутся в однородном электростатическом поле. Для более полного изучения всех возможных направлений движения частиц относительно направления силы тяжести расчеты проводились для двух крайних случаев. В первом случае направление силы тяжести совпадало с направлением вектора напряженности электростатического поля, а во втором — сила тяжести действовала в противоположном направлении.

При выполнении расчетов вычислялась скорость движения частиц размером 1, 10 и 100 мкм, плотностью 2000 и 19 300 кг/м³ в электростатических полях напряженностью 10⁵ и 10⁶ В/м. Анализ полученных данных позволил установить, что частицы размером менее 10 мкм приобретают максимальную скорость, пройдя расстояние 10—15 см. При прочих равных условиях с увеличением размеров частиц и уменьшением их плотности скорость движения частиц в электростатическом поле возрастает. Целесообразно при ускорении частиц в воздухе применять электростатические поля с большим градиентом потенциала.

2. Исследование фокусирующих свойств сетчатых электродов методом моделирования

Фокусирующие свойства сетчатых электродов изучались также методом моделирования электростатических полей на электропроводящей бумаге и в электролитической ванне. Моделирование полей позволяло оценить правомерность сделанных при расчетах полей допущений и получить более полные сведения о характере и особенностях движения частиц микронных размеров в электростатических полях сложной конфигурации.

Необходимым условием моделирования является тождественность дифференциальных уравнений и граничных условий, описывающих исследуемый объект и его модель. Нетрудно показать, что распределение потенциала между электродами в изолирующей среде не изменится, если пространство между ними заполнить проводящей средой соответствующей проводимости.

Метод электропроводящей бумаги является наиболее современной разновидностью метода твердых проводящих слоев. В последнее время он широко применяется при исследовании плоских и осесимметричных электростатических полей. Этот метод характеризуется простотой и точностью изготовления моделей, а также использованием для измерений постоянного тока, что значительно упрощает схему измерений и облегчает работу. Однако по сравнению с электролитической ванной метод электропроводящей бумаги обладает значительно меньшей точностью. Поэтому при изучении электростатических полей сетчатых электродов моделирование на электропроводящей бумаге дополнялось измерениями в электролитической ванне, для чего изготавливались из латуни модели мелкоструктурных сеток, увеличенные в 10⁴ раз по сравнению с оригиналом. Модели воспроизводили три смежные ячейки сетки, причем точно повторялась геометрическая конфигурация прутков сетки. Для получения сравнимых результатов измерения в электролитической ванне и на электропроводящей бумаге проводились при одинаковой напряженности поля и потенциалах на электродах.

В процессе моделирования определялось положение эквипотенциальных поверхностей при помощи мостиковой схемы с гальванометром, использовавшимся в качестве нулевого индикатора.

тора. По характеру эквипотенциальных поверхностей графоаналитическими методами определялись траектории движения частиц в электростатическом поле. Для построения траекторий использовался метод плоского конденсатора.

Методом моделирования исследовалось фокусирующее действие электростатического поля, создаваемого сетчатыми электродами при отношении напряженности электростатического поля за сетчатым электродом к напряженности поля перед ним 1,5 : 1; 4 : 1; 8 : 1 и 10 : 1. Рассматривался также случай, когда поле перед сетчатым электродом равнялось нулю.

Минимальная толщина прутков сеток определялась при условии достаточной механической прочности сетки и составляла 4 мкм. Размер ячеек при моделировании изменялся от 5 до 50 мкм. Максимальная напряженность поля определялась величиной пробивной напряженности его в воздухе при атмосферном давлении (примерно 30 кВ/см).

Конфигурация электростатического поля вблизи сетчатого электрода с прутками $d=4$ мкм и ячейкой шириной $b=5$ мкм показана на рис. 3. При отношении толщины прутка сетки к ширине ячейки примерно 0,8 и более фокусирующий эффект электростатического поля незначителен.

При увеличении ширины ячейки до 10 мкм, тем более до 15 мкм (рис. 4), при одинаковой толщине прутков (5 мкм) проникновение более сильного поля в область слабого увеличивается, что приводит к увеличению эффекта фокусировки.

Максимальное фокусирующее действие электростатического поля достигается при $b \gg d$ (рис. 5). При использовании таких сеток, даже при малом отношении E_2/E_1 , траектории частиц значительно искривляются к центру ячейки, что увеличивает вероятность проникновения частиц через сетчатый электрод.

Исследовалась также возможность увеличения механической прочности сетки наращиванием высоты h прутков сетки при сохранении их прежней толщины ($h:d=2:1$). Конфигурация электростатического поля вблизи такой сетки с ячейкой размером $b=10$ мкм показана на рис. 6.

Увеличение h отрицательно влияет на фокусирующие свойства сетчатых электродов, особенно для сетки с ячейкой размером, равным толщине прутка. Более сильное поле в этом случае не проникает в область поля меньшей напряженности.

Увеличение высоты прутков сетчатых электродов приводит к ослаблению фокусирующего эффекта, особенно при малых размерах ячеек. Улучшение фокусирующего действия сеток при размерах ячеек в несколько микрон и увеличенной высоте прутков за счет создания электростатических полей более высокой напряженности ограничено величиной пробивной напряженности (примерно 30 кВ/см для воздуха). На практике предельная напряженность электрического поля оказывается гораздо меньшей вследствие большой концентрации частиц в межэлектродном

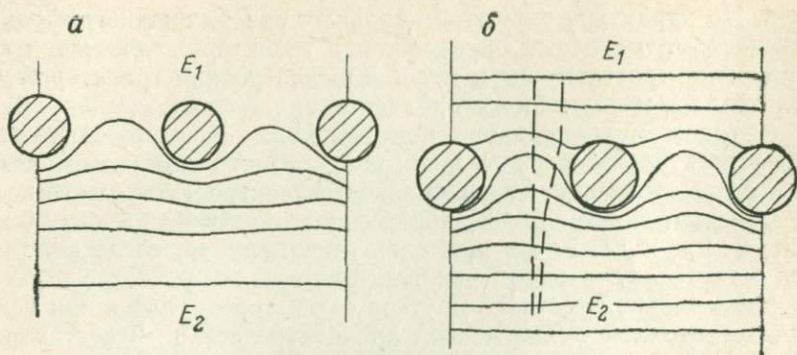


Рис. 3. Электростатическое поле вблизи сетчатого электрода ($d=4$ мкм, $b=5$ мкм):
 а — поле перед сеткой $E_1=0$; поле за сеткой $E_2=2,5 \cdot 10^6$ В/м; б — $E_2/E_1=10$

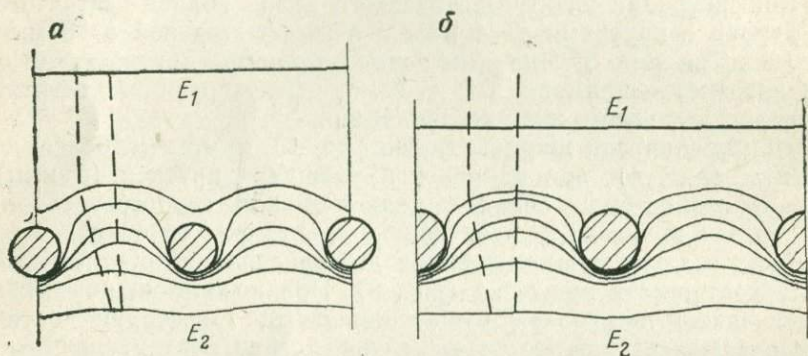


Рис. 4. Электростатическое поле вблизи сетчатого электрода ($d=5$ мкм, $b=15$ мкм):
 а — $E_2/E_1=8$; б — $E_2/E_1=4$

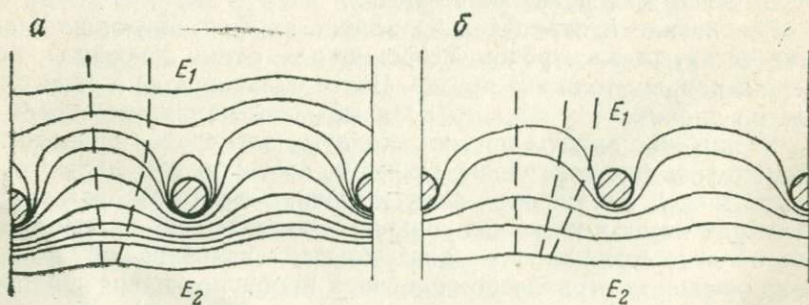


Рис. 5. Электростатическое поле вблизи сетчатого электрода ($d=10$ мкм, $b=50$ мкм):
 а — $E_2/E_1=8$; б — $E_2/E_1=4$

пространстве, заряд которых заметно искажает внешнее поле. Поэтому наиболее приемлемой конфигурацией поперечного сечения прутков мелкоструктурных сеток следует признать круг.

Помимо уменьшения фокусирующего эффекта электростатического поля при малых размерах ячеек (меньше 10 мкм) на-

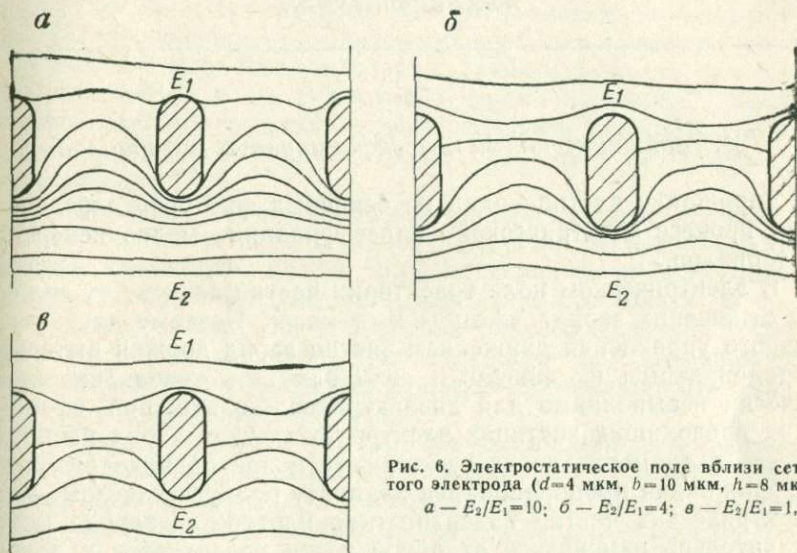


Рис. 6. Электростатическое поле вблизи сетчатого электрода ($d=4$ мкм, $b=10$ мкм, $h=8$ мкм):
 а — $E_2/E_1=10$; б — $E_2/E_1=4$; в — $E_2/E_1=1,5$

блюдается также снижение производительности электроклассификации вследствие снижения прозрачности мелкоструктурных сеток (от 60% при $b=28$ мкм и $d=8$ мкм до 30% при $b=5$ мкм и $d=4$ мкм), увеличить которую не представляется возможным.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, использовать фокусирующие свойства электростатических полей сетчатых электродов целесообразно при ячейках сетки размером больше толщины ее прутков, т. е. при размерах не менее 7 мкм. В этом случае вероятность прохождения частиц через сетки в присутствии фокусирующего поля увеличивается не менее чем в 1,5—2 раза при ячейках сетки размером от 7 до 30 мкм.

Данные расчетов и результаты моделирования фокусирующих электростатических полей сетчатых электродов показывают, что фокусировка частиц ячейками сетчатых электродов возрастает при увеличении отношения E_2/E_1 . Это обстоятельство следует учитывать при выборе потенциалов сетчатых электродов.

Фокусирующее поле сетчатых электродов позволяет и ускорять частицы при пролете ими межэлектродного пространства, что также интенсифицирует процесс классификации тонкодисперсных материалов.

Глава II
ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ФЛЮИДИЗАЦИОННО-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ
КЛАССИФИКАЦИИ

1. Заряжание частиц классифицируемых материалов

Заряжание частиц—один из основных факторов, определяющих процесс электрической классификации мелкодисперсных материалов.

В электрическом поле траектории частиц зависят от величины отношения заряда частицы к ее массе. Поэтому для эффективного управления движением частиц заряд должен быть пропорциональным их линейным размерам. Это требование практически невыполнимо для диэлектриков. Только при сферических проводящих частицах электростатический заряд распределяется равномерно по их поверхности и при одинаковом способе заряжания пропорционален квадрату радиуса частицы. У диэлектрических частиц поверхностная плотность заряда может значительно изменяться от одной точки поверхности к другой. В связи с этим заряды одинаковых по размеру частиц диэлектриков неправильной формы будут различны в зависимости от степени отклонения их формы от сферической и от распределения зарядов по поверхности частиц.

Для увеличения воздействия электрического поля на частицы необходимо, чтобы их заряд был максимальным. Достигается это выбором оптимального способа сообщения частицам электрического заряда. Сообщаемый частицам заряд должен достигать предельной величины за минимальное время, так как только в этом случае процесс электроклассификации будет производительным.

Так как форма, размер, состав и однородность (одинаковый химический состав) мелких частиц весьма разнообразны, то и процессы их заряжания несравненно сложнее, чем механизм перехода зарядов между двумя массивными телами простой конфигурации и однородного состава.

Наиболее распространенными способами зарядки частиц, применяемыми при электрической классификации мелкодисперсных материалов, являются трибозаряжание, заряжание в поле коронного разряда и электризация при контакте с заряженной металлической поверхностью. Заряжание частиц инфракрасными и ультрафиолетовыми лучами, ионизирующими излучениями, за счет пиро- и пьезоэлектрического эффекта и другие

не получило широкого распространения. В последние годы разработан ряд оригинальных способов зарядания дисперсных материалов, обеспечивающих значительный по величине униполярный заряд [61, 62].

Трибоэлектрическое зарядание частиц известно давно, однако природа и закономерности этого явления еще полностью не изучены [63]. В опубликованной литературе [64, 65] в основном приводятся экспериментальные результаты определения величины трибозаряда, зависимость его от различных параметров и др. В последнее время появились работы, в которых сделана попытка систематизировать экспериментальные данные и подвести единую теорию под понятие статической электризации [63].

Трибозаряд порошков обычно на два порядка меньше, чем при зарядании в поле коронного разряда и при контактном способе зарядания. Кроме того, на величину и знак трибозаряда оказывают влияние многие факторы: состояние поверхности частиц, наличие на ней пленок окислов и других веществ, влажность и др. Поэтому трибозарядание при электроклассификации мелкодисперсных материалов применяется значительно реже других методов зарядания.

Следует учитывать, что зарядке частиц при их классификации предшествует распыление порошков, при котором частицы трутся друг о друга и об элементы конструкции с образованием электрического заряда на их поверхности, весьма значительного для диэлектрических частиц. Величина и полярность электрического заряда частиц при распылении порошков определяется многими факторами [63], главными из которых являются: образование двойного электрического слоя при соприкосновении материалов, отличных по своим физическим свойствам; разрушение структур контактирующих поверхностей при столкновении частиц в потоке газа; характер и степень загрязненности поверхности частиц; локальный нагрев в точках контакта сталкивающихся частиц. Если до распыления частицы не касались поверхности каких-либо материалов, то в облаке распыленных порошков обычно наблюдается симметричное распределение зарядов на частицах (количество положительно и отрицательно заряженных частиц одинаково) [64].

В результате трения частиц порошков о конструктивные элементы распылительного устройства имеет место несимметричное зарядание, причем асимметрия в распределении заряда возрастает с увеличением размера частиц. Увеличив вероятность контакта частиц с твердой поверхностью, можно сместить спектр распределения зарядов на частицах в сторону преобладания частиц с какой-либо одной полярностью заряда. Однако полной униполярности зарядания системы частиц при распылении получить невозможно.

Влияние многочисленных и различных по своему воздейст-

вию факторов не позволяет получать воспроизводимые результаты в экспериментах по исследованию зарядки порошковых материалов при их распылении.

Из всех известных способов зарядания частиц наиболее глубоко теоретически и экспериментально исследовано зарядание в поле коронного разряда [34, 35, 66—69]. Под коронным разрядом понимают особую форму разряда в газе, возникающую при наличии резко неоднородного электрического поля и давления газа, близкого к атмосферному. Зарядание аэрозолей в поле коронного разряда происходит в результате направленного движения ионов к частице под действием внешнего поля и диффузии ионов к поверхности частицы. Относительная роль этих процессов зависит от размера частиц. Заряд частиц размером, превышающим 2—3 мкм, определяется в основном дрейфом ионов в электрическом поле, и диффузией ионов можно пренебречь. Теория зарядания для этого случая была разработана и экспериментально подтверждена Потенье и Моро-Гано, которые показали, что заряд частиц возрастает пропорционально квадрату радиуса r частицы.

По мере уменьшения размеров частиц заметный вклад в заряд начинают вносить диффузионные процессы, и при $0,1 \leq r \leq \leq 2-3$ мкм следует учитывать оба механизма зарядания.

Зарядание частиц аэрозоля размером $r < 0,08-0,1$ мкм осуществляется в результате лишь диффузионных процессов, при этом заряд частицы оказывается пропорциональным ее радиусу. Зарядка аэрозолей с частицами размером $0,1 \leq r \leq 2-3$ мкм рассмотрена Г. З. Мирзабекяном, показавшим, что с достаточной точностью величину заряда можно подсчитать как сумму зарядов, обусловленных направленным движением ионов и диффузионными процессами.

Заряд частиц, приобретаемый в поле коронного разряда, зависит от величины тока короны, времени нахождения частицы в зоне зарядки, размеров частицы, ее формы, влажности среды, места пролета, природы частицы.

В поле коронного разряда частицы получают заряд, равный 90% предельного, примерно за 0,1 с [34]. Экспериментальные работы по кинетике зарядания частиц данным методом указывают на значительную зависимость скорости зарядки и величины предельных зарядов от наличия влаги на поверхности самих частиц. Для диэлектрических частиц повышение влажности приводит к увеличению их поверхностной электропроводности и, следовательно, способствует более равномерному распределению заряда на поверхности частицы. Предельные заряды в поле коронного разряда для частиц размером около 10 мкм составляют 10^3-10^4 элементарных зарядов (в зависимости от формы частиц и состояния их поверхности) [61]. Для более крупных частиц предельные заряды увеличиваются пропорционально их поверхности.

Недостатками метода зарядки частиц в поле коронного разряда являются: необходимость применения источников высокого напряжения (несколько десятков киловольт); зависимость величины заряда от координаты пролета частицы; недопустимость большой концентрации частиц заряжаемого материала в зоне зарядки; нежелательное усложнение конструкции электро-сепараторов вследствие наличия объемного заряда и высокой напряженности электрического поля в зоне зарядки.

При зарядке частиц ионами в поле коронного разряда необходимо создавать высокоскоростные газовые потоки для выноса заряженных частиц из области сильного электрического поля. Это ведет к уменьшению времени пребывания частиц в зоне зарядки, а следовательно, и к уменьшению величины их заряда. Увеличить заряд частиц возможно путем воздействия на аэрозоль и ионы высокочастотным электрическим полем [62]. С этой целью диспергированный материал направляют вместе с потоком газа в зарядную камеру, представляющую собой конденсатор плоского или цилиндрического типа. Одновременно с частицами в зарядную камеру поступают униполярные ионы от ионного источника. Электроды конденсатора подключают к высокочастотному генератору высокого напряжения, благодаря чему поступающие в зарядную камеру ионы осциллируют между электродами. Заряжаемые же частицы вследствие большой массы не меняют практически своего движения. В результате удается повысить число столкновений ионов с частицами и тем самым увеличить эффективность зарядки диспергированных частиц. Эффективность зарядки будет максимальна, если ионы осциллируют перпендикулярно к направлению газового потока. Частоту генератора выбирают в пределах 1 кГц — 1 МГц при максимальной амплитуде напряжения 40 кВ.

Контактное зарядание — наиболее простой и эффективный метод сообщения заряда частицам [70, 71]. Механизм контактного зарядания отдельных частиц и систем частиц до сих пор полностью не изучен. Сравнительно недавно исследователи обратили внимание на такие вопросы, как максимальная величина заряда частиц произвольной формы, влияние состояния поверхности частиц и электрода, распределение заряда на частицах и процентное содержание заряженных частиц в потоке [72, 73]. В принципе частицы могут приобретать достаточно высокий заряд при простом трении о заземленные металлические поверхности. Однако если металлическую поверхность, с которой контактируют частицы, не заземлять, а подать на нее потенциал, то зарядание становится более устойчивым, существенно повышается процентное содержание частиц с одинаковой полярностью заряда (до 70—80%) и в несколько раз увеличивается заряд отдельных частиц.

Контактное зарядание наиболее применимо для частиц с высокой электропроводностью (с объемным сопротивлением

10^4 — 10^5 Ом·см). Для металлических частиц скорость заряжения определяется только сопротивлением контакта, т. е. состоянием поверхности электрода и частицы. В то же время скорость заряжения диэлектрических и полупроводящих частиц зависит от многих причин: концентрации носителей заряда (для полупроводников), объемной и поверхностной проводимости, геометрической формы частиц, внешней среды и т. д. Одним из факторов, определяющих максимальную величину заряда частиц при контактном методе заряжения, является равенство сил адгезии, гравитационной и кулоновского отталкивания.

Процесс контактного заряжения состоит из двух этапов [72]. На первом этапе заряжение происходит за счет перетекания заряда, когда частица находится на металлической поверхности, на которую подан потенциал. На втором этапе имеет место стекание зарядов при отрыве частицы от электрода.

Величина заряда и механизм заряжения на первом этапе определяется напряженностью поля на поверхности частицы, ее электрическими свойствами, состоянием поверхности зарядного электрода, давлением, влажностью и температурой внешней среды. При удалении частицы от электрода уменьшается ее собственная емкость и начинает сказываться влияние внешнего поля. Уменьшение собственной емкости частицы приводит к увеличению напряженности поля на ее поверхности. В результате можно ожидать уменьшение заряда частицы вследствие возникновения газового разряда в промежутке частица — электрод [63]. Возникновению разряда способствует и перераспределение поверхностного заряда частицы под влиянием внешнего поля. Аналогичные явления происходят и при контактном заряжении диэлектрических и полупроводящих частиц.

Теоретический анализ контактного заряжения весьма сложен. Заряд q (в Кл) металлической частицы вычисляется по простой формуле

$$q = CU,$$

где C — емкость частицы, Ф; U — потенциал частицы, В.

Однако часто емкость определить трудно. Известно, что емкость частицы складывается из собственной емкости и взаимной емкости частицы по отношению к другим телам. Формулы, выражающие емкость через параметры частицы, даже в простейших случаях представляют собой ряды с медленно сходящимися членами. Практически эти формулы неудобны для применения [74]. Кроме того, вычислить напряженность электрического поля на поверхности заряжающего электрода довольно трудно вследствие наличия окружающих тел.

Разность работ выхода материалов частицы и электрода (контактный потенциал) не должна иметь существенного значения, когда поверхность контакта составляет незначительную

часть всей поверхности частицы. Однако для частиц диаметром примерно 1 мкм, или когда размер шероховатостей электрода соизмерим с величиной частиц, зарядание за счет контактной разности потенциалов следует учитывать [63].

Самым распространенным способом контактного зарядания частиц является зарядка от плоскостей (при контакте с плоскостью или при ссыпании с нее) и от сетчатых электродов. Если частица металлическая, то заряд ее практически мгновенно достигает предельной величины, определяемой размером частицы и структурой ее поверхности. При этом знак заряда частицы совпадает с полярностью подаваемого на электрод потенциала. Заряд частиц в этом случае достигает такой же величины, как и в поле коронного разряда.

Зарядка полупроводниковых частиц происходит аналогично. Однако заряжаются такие частицы не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, длительность которого зависит от электрического сопротивления материала частицы. Перенос заряда в диэлектрических частицах осуществляется только в точке контакта. Для эффективного зарядания таких частиц при контактном способе требуется устройство, обеспечивающее многократное касание разными точками поверхности частицы зарядного электрода, что усложняет процесс зарядания.

Зарядание полупроводящих и диэлектрических частиц облегчается, если зарядка происходит в нормальных атмосферных условиях, так как все материалы в большей или меньшей степени гигроскопичны. Учитывая, что вода является сильно дипольным диэлектриком ($\epsilon=80$) со сравнительно низким удельным объемным сопротивлением ($\rho=10^5-10^6$ Ом·см), адсорбция ее на поверхности твердых диэлектриков заметно влияет на их электрические свойства. В первую очередь наличие влаги влияет на удельное сопротивление диэлектриков. Адсорбция влаги на поверхности диэлектриков непосредственно связана с относительной влажностью окружающей среды. Поэтому относительную влажность можно считать одним из решающих факторов, определяющих поверхностную проводимость материала. Особенно резко уменьшается поверхностное сопротивление при относительной влажности, превышающей 50% [75].

Существенное влияние на адсорбцию влаги оказывает загрязнение поверхности частиц. Установлено [63], что на чистых поверхностях стекла, кварца и серы в воздухе относительной влажностью 90% при 20°C образуется чрезвычайно тонкий слой влаги (примерно 5 Å). Однако при наличии на этих поверхностях соли или других загрязнений наблюдались пленки влаги толщиной порядка 1000 Å.

Наличие на поверхности частиц пленки влаги толщиной 500 Å значительно уменьшает время их зарядки. Полагая практически приемлемым временем натекания максимального заряда 0,1—1 с, материалы с удельным объемным сопротивлением

$\rho \leq 10^6$ Ом·см можно заряжать контактным способом без увлажнения. Материалы с $\rho \geq 10^6$ Ом·см при зарядании контактным способом целесообразно увлажнять.

К достоинствам контактного способа зарядания частиц относится небольшая затрата электроэнергии, отсутствие объемного заряда ионов и меньшее требуемое напряжение по сравнению с коронной зарядкой. Достаточно высокую напряженность поля на заряжающем электроде (примерно 10^6 В/м) можно создать при относительно невысоких потенциалах, например, напряженность поля $2 \cdot 10^6$ В/м создается при потенциале на электроде 4000 В и величине межэлектродного промежутка 2 мм.

Эффективным способом зарядания мелкодисперсных частиц является зарядание электроаэрозолем электрически распыляемой жидкости [61]. При электростатическом распылении жидкостей образуется облако мелкодисперсного тумана из сильно заряженных капелек, причем размер их может составлять единицы микронов. Величину заряда капелек можно определить на основании критерия Релея [76] для предельной величины поверхностной плотности заряда жидких капель. В соответствии с критерием Релея у частиц диаметром $(1-10) \cdot 10^{-6}$ м поверхностная плотность заряда может достигать $(1,4-3,2) \cdot 10^{-5}$ Кл/м², причем она уменьшается с увеличением радиуса капель r как $\frac{1}{\sqrt{r}}$. Теоретически такую плотность заряда можно получить при зарядании металлических частиц в коронном разряде в случае напряженности электрического поля $(10-15) \cdot 10^5$ В/м.

При этом способе зарядки дисперсный материал и электростатически распыленная легко испаряющаяся жидкость подаются в смесительную камеру, где происходит коагуляция заряженных капелек жидкости с частицами материала, находящегося во взвешенном состоянии. При соблюдении определенных условий все частицы в смесительной камере оказываются заряженными одинаковым по знаку зарядом. Заряженные частицы выносятся из зарядника потоком воздуха, при этом с поверхности частиц испаряется жидкая фракция (главным образом нейтральные молекулы). Это явление подтверждается исследованием динамики поведения подвешенной в электрическом поле жидкой заряженной капли [76]. Испарившаяся жидкость может конденсироваться для повторного использования [77].

Основные требования, которым должны удовлетворять жидкости, используемые для зарядки твердых частиц, заключаются в следующем: жидкость должна хорошо распыляться в электрическом поле (иметь $\rho \approx 10^6 \div 10^8$ Ом·см и поверхностное натяжение $\gamma = 20 \div 30$ дн/см), быть летучей, не токсичной, не взрывоопасной и не вступать в химическую реакцию с материалом заряжаемых частиц.

К таким жидкостям относятся, например, органические спирты и растворители. Так, этиловый спирт C_2H_5OH имеет $\rho = 5 \cdot 10^6$ Ом·см и $\gamma = 22,3$ дн/см, этиленгликоль CH_2OH-CH_2OH — $\rho = 1,1 \cdot 10^6$ Ом·см и $\gamma = 46,1$ дн/см.

Проведенные расчеты [61] показывают, что предельный заряд частиц при зарядке жидкими электроаэрозолями может превосходить заряд частиц в поле коронного разряда. Величина предельного заряда твердых частиц во многом определяется величиной заряда частиц электроаэрозоля и напряженностью внешнего поля.

Эксперименты с заряданием полупроводящих частиц люминофора БМ-3 с эффективным диаметром частиц 7—12 мкм и диэлектрических частиц электрокорунда белого с эффективным диаметром 4—18 мкм электроаэрозолем этилового спирта и этиленгликоля позволяют сделать вывод, что твердые частицы при этом приобретают униполярный заряд, величина которого превышает заряд, получаемый частицами в поле коронного разряда [64]. Величина заряда твердых частиц практически не зависит от полярности заряда жидких частиц электроаэрозоля и составляет $(1-9,5)10^{-16}$ Кл при потенциале на распылителе 11 кВ (средняя поверхностная плотность зарядов составляет $3 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$ Кл/м²).

Способ зарядания порошковых материалов электроаэрозолями электростатически распыленной жидкости требует дальнейшего углубленного изучения для уточнения области его применения при электросепарации. Для выбора оптимального способа зарядания частиц мелкодисперсных материалов необходимо исследовать рассмотренные выше методы сообщения электрического заряда применительно к конкретному материалу.

Экспериментальное изучение различных способов зарядки частиц и нахождение эмпирических формул для оценки величины их заряда имеет большое значение для создания основ расчета зарядания частиц в процессах электроклассификации.

2. Измерение интегральных и дифференциальных зарядов частиц микропорошков

При измерении электрического заряда частиц дисперсных материалов применяют метод интегрального заряда, т. е. измерение среднего заряда большого количества частиц, и метод дифференциального заряда, т. е. измерение заряда отдельных частиц.

Измерение интегрального заряда тонкодисперсных материалов заключается в измерении малых токов и напряжений. При измерении заряда частиц по величине тока частицы из зарядного устройства равномерным потоком подаются на коллектор, представляющий собой металлическую изо-

лированную пластину. Если коллектор соединен с землей через высокоомное сопротивление R_0 , то

$$I_x = \frac{U_0}{R_0}, \quad (8)$$

где I_x — измеряемый ток, А; U_0 — падение напряжения на сопротивлении R_0 , В.

Измеряя ток в течение некоторого времени, определяют интегральный заряд частиц Q (в Кл/кг):

$$Q = \frac{I_x t}{M}, \quad (9)$$

где t — время измерения, с; M — масса частиц на коллекторе, кг.

Метод измерения интегрального заряда частиц по величине тока может быть применен только при равномерной подаче частиц на коллектор, а также когда скорость перехода заряда на коллектор в несколько раз больше постоянной времени регистрирующего прибора τ (в с)

$$\tau = R_0 C_{вх}, \quad (10)$$

где $C_{вх}$ — входная емкость прибора, Ф.

Поэтому для наших целей предпочтительнее метод измерения потенциала. При определении интегрального заряда частиц этим методом в качестве регистрирующих применяются приборы с минимальным потреблением мощности. К таким приборам относятся механические электрометры [78], ламповые электрометры с динамическим конденсатором [79] и электростатические вольтметры [80]. Интегральный заряд в этом случае измеряется следующим образом. Заряженные частицы помещают на изолированную пластину, имеющую некоторую емкость относительно земли. Если утечка заряда через изолятор незначительна, то интегральный заряд Q (в Кл/кг) частиц определяется (после измерения потенциала пластины) по формуле

$$Q = \frac{CU_0}{M}, \quad (11)$$

где $C = C_0 + C_{п}$ — емкость относительно земли системы пластины (C_0) + соединительные проводники и измерительный прибор ($C_{п}$), Ф.

При измерении заряда Q по изменению потенциала образцового конденсатора требования к изоляции пластин конденсатора должны быть высокими. В качестве изолятора рекомендуется использовать фторопласт-4 или янтарь. Сам конденсатор должен быть воздушным, так как он обладает наименьшей утечкой. При длительной работе с образцовым конденсатором меняется контактная разность потенциалов в местах

присоединения выводов к пластинам конденсатора. Поэтому рекомендуется эти места серебрить, а также периодически градуировать прибор.

Большими преимуществами обладает компенсационный метод измерения. В этом случае электрометр служит нулевым индикатором. По мере натекания заряда на образцовый конденсатор C_0 потенциометром вводится компенсирующее напряжение U_k , которое в любой момент времени равно напряжению на C_0 и обратно ему по знаку, о чем свидетельствует отсутствие показаний электрометра. Емкость соединительных проводов и измерительного прибора C_{Π} при этом не заряжается. Следовательно,

$$Q = \frac{C_0 U_k}{M}.$$

Рассмотрим вопросы, касающиеся точности и чувствительности при измерении интегрального заряда. При определении малых токов методом измерения падения напряжения на известном сопротивлении R_0 минимально возможный регистрируемый ток $I_{x_{\text{мин}}}$ ограничивается тепловым шумом сопротивления, флуктуациями проводимости, климатическими факторами и эффектами старения сопротивления. Шумы сопротивления обусловлены хаотическим движением в нем электронов. Для $T=293$ К, $C_{\text{вх}}=10^{-11}$ Ф, $R_0=10^{12}$ Ом $I_{x_{\text{мин}}}=1,6 \cdot 10^{-16}$ А. Как показывает опыт, остальные вышеперечисленные факторы ухудшают чувствительность метода в лучшем случае еще на один-два порядка.

Определение заряда методом образцового конденсатора является более точным. При вышеприведенных параметрах $I_{x_{\text{мин}}}=5,4 \cdot 10^{-17}$ А. Кроме того, при определении заряда этим методом отсутствуют влияние временной нестабильности больших сопротивлений и токовые шумы.

В случае применения в качестве регистрирующих приборов электростатического вольтметра С-50 и аналитических весов АДВ-200 погрешность измерения интегрального заряда не превышает 3—5% (в зависимости от емкости системы и чувствительности вольтметра). Емкость системы относительно земли сделать менее $2 \cdot 10^{-11}$ Ф практически невозможно, так как емкость электростатического вольтметра со шкалой 0—30 В составляет 10^{-11} Ф. Поэтому величину $C=2 \cdot 10^{-11}$ Ф можно принять за минимально возможную. Наименьший потенциал, который можно измерить электростатическим вольтметром, составляет 5 В. Поэтому минимальный регистрируемый заряд оказывается равным 10^{-10} Кл.

Чувствительность метода можно повысить, используя в качестве регистрирующего прибора механический электрометр — высокочувствительный, но очень неустойчивый в ра-

боте прибор, требующий квалифицированного обращения. Кроме того, на эти приборы большое влияние оказывают внешние электрические поля.

Самыми чувствительными из механических электрометров являются квадрантные. При вспомогательном напряжении на электродах примерно 100 В и расстоянии до шкалы 1 м постоянная по напряжению в обычных конструкциях равна $(2-3) \cdot 10^{-4}$ В, что соответствует минимальной величине регистрируемого заряда $10^{-14}-10^{-15}$ Кл.

Менее чувствительны, но более удобны в работе струнные электрометры с меньшим периодом колебаний и собственной емкостью $(3-5) \cdot 10^{-12}$ Ф. Различают однонитные и двухнитные струнные электрометры. Двухнитные электрометры обладают меньшей чувствительностью, чем однонитные. Их чувствительность не превышает 1 дел/В. При емкости измерительной схемы примерно $3 \cdot 10^{-11}$ Ф минимальный заряд, регистрируемый двухнитным электрометром, равен примерно 10^{-11} Кл. Значительно большей чувствительностью обладает однонитный струнный электрометр типа «Вульф» или «Лютц» с вспомогательным полем. При подаче на ножи электрометра вспомогательного потенциала 100 В и диаметре нити 1,5 мкм чувствительность равна $2 \cdot 10^{-3}$ В, что соответствует минимальному регистрируемому заряду $10^{-13}-10^{-14}$ Кл.

Для измерения исключительно электрических зарядов применяются крутильные электрометры СГ-1М, СГ-2М. Основное преимущество этих электрометров заключается в их малой собственной емкости, которая составляет примерно $2,5 \times 10^{-12}$ Ф. Чувствительность электрометров к напряжению невысока: для СГ-1М она равна 0,021 В, а для СГ-2М — 0,8—1 В. Тем не менее, ввиду малой емкости, минимальный регистрируемый заряд для СГ-1М составляет примерно 10^{-14} Кл, а для СГ-2М — $10^{-12}-10^{-13}$ Кл.

Несмотря на высокую чувствительность, механические электрометры неудобны в работе, особенно при многочисленных измерениях, ввиду большой затраты времени на проведение замеров. Последнее обстоятельство связано с использованием для снятия показаний оптических приборов. При использовании светового луча, отраженного от зеркальца (квадрантные электрометры) и шкалы, отнесенной от прибора на расстояние 1—2 м, необходимо специальное помещение для экспериментов, не подвергаемое вибрациям и тряске, что практически трудно осуществить. В силу указанных выше причин механические электрометры целесообразно применять только в лабораторных условиях.

Чувствительность электрометров с динамическим конденсатором примерно на порядок выше механических. В электрометрах с динамическим конденсатором (динамические электрометры) постоянные сигналы преобразуются в переменные

с последующим усилением. Эти электрометры обладают высоким входным сопротивлением и применяются тогда, когда внутреннее сопротивление источника сигналов велико. Постоянный ток преобразуется в переменный в большинстве случаев с помощью конденсатора, емкость которого периодически изменяется путем перемещения его пластин относительно друг друга либо путем изменения диэлектрической постоянной среды между его обкладками.

Важной особенностью динамических электрометров является их большое входное сопротивление. Оно ограничивается лишь сопротивлением изоляции между пластинами виброконденсатора, поэтому чувствительность к току у этих электрометров может быть очень большой. Если сопротивление изоляции, например, 10^{15} Ом, емкость конденсатора C_0 50 пФ, порог чувствительности по напряжению у такого электрометра 50 мкВ, то порог чувствительности по току равен 5×10^{-19} А.

Предельная чувствительность динамического электрометра определяется шумами входной цепи и дрейфом нуля. Основную роль играют шумы входной цепи. Несмотря на то что усиление сигнала в динамическом электрометре ведется на переменном токе, в нем наблюдается остаточный дрейф нуля. Причиной этого является изменение контактной разности потенциалов между пластинами динамического конденсатора в зависимости от времени. Поэтому пластины конденсатора полируют и золотят, а сам конденсатор помещают в вакуумплотный кожух, заполненный аргоном. Величина дрейфа у электрометров с динамическим конденсатором составляет 5—10 мкВ/ч. Электрометры с динамическим конденсатором по ряду характеристик превосходят другие типы электрометров, однако они очень сложны в изготовлении, поэтому нами применялись механические струнные электрометры. Измерение заряда этими электрометрами предпочтительнее измерений электростатическим вольтметром, так как одновременно с величиной потенциала электрометр показывает полярность интегрального заряда частиц.

Следует отметить, что методы измерения малых токов и напряжений не требуют сложных приборов и позволяют быстро получать необходимую информацию о заряде частиц. Однако эти методы имеют серьезные недостатки: можно измерять заряд только тех частиц, которые имеют заведомо одинаковую полярность, невозможно определить процент незаряженных частиц. Измерение интегрального заряда не раскрывает величины электрического заряда отдельных частиц, а лишь дает возможность определить относительное преобладание частиц с зарядом той или иной полярности.

Измерение дифференциального заряда тонкодисперсных материалов при электрической клас-

сификации микропорошков необходимо для того, чтобы установить зависимость величины электростатического заряда частиц от их размера (или массы) и формы.

Метод непосредственного измерения заряда частиц заключается в улавливании заряженной частицы в изолированный сосуд, соединенный с электрометром. По отклонению нити электрометра измеряют заряд, принесенный частицей. Так как в реальных условиях емкость измерительного сосуда и соединенных с ним проводников не удастся сделать меньше 10—30 пФ, а чувствительность механического электрометра равна примерно 100 дел/В, то минимальный измеряемый таким способом заряд будет равен 10^{-13} Кл. Это значит, что таким способом можно регистрировать заряд отдельных частиц размером несколько сотен микрон и более.

Описанный метод измерения заряда отдельных частиц является очень трудоемким и требует длительного времени для получения исчерпывающих данных.

Применяя ламповые электрометры, можно увеличить чувствительность и ускорить измерение. В этом случае регистрируются частицы с зарядом 10^{-14} — 10^{-15} Кл. Электрометры с динамическим конденсатором позволяют существенно снизить порог регистрируемых зарядов. Минимальный заряд, который регистрируется в этом случае, составляет примерно 10^{-16} Кл. Применение ламповых и динамических электрометров для измерения зарядов отдельных частиц связано с кропотливой работой по экранировке входа усилителя от внешних наводок. Механические, ламповые и динамические электрометры применяются в основном для регистрации зарядов относительно крупных частиц.

Индукционный метод измерения зарядов [81] обладает рядом преимуществ по сравнению с методом непосредственного измерения. Сущность метода состоит в том, что заряженная частица пролетает через изолированное металлическое кольцо. Заряд, индуцированный на кольце, измеряется обычно ламповым электрометром и является мерой заряда частицы. Очевидно, индуцированный заряд составляет только долю общего измеряемого заряда частицы. Эта доля в зависимости от геометрических размеров кольца может составлять 0,7—0,8 общего заряда. Например, для кольца диаметром 5 см и высотой 2 см доля индуцированного заряда составляет 0,26. Требования к сопротивлению изоляции снижаются по сравнению с требованиями, предъявляемыми к сопротивлению утечки изоляции при непосредственном измерении, так как импульс действует кратковременно, и постоянная времени электрометра должна быть такой, чтобы за время пролета частицы индуцированный заряд не успел стечь с кольца. При скорости движения частицы 1 м/с сопротивление изоляции может не превышать 10^{10} — 10^{11} Ом. Для защиты измерительного электрода от

внешних электрических полей применяется металлический заземленный экран. Эффективность работы прибора, величина и форма измеряемого импульса в значительной степени зависят от параметров измерительного электрода и окружающего его экрана.

Точность измерения заряда частиц индукционным методом зависит от стабильности работы электрической схемы и может быть достаточно высокой, если регистрируемая частица движется через центр кольца. Минимальная величина измеряемых зарядов составляет обычно 10^{-14} Кл. Наиболее важными преимуществами индукционного метода являются возможность одновременного измерения заряда и размера частицы, а также минимальное время измерения.

Рассмотренные методы измерения зарядов отдельных частиц, к сожалению, непригодны для частиц размером менее 20 мкм, несущих заряд меньше 10^{-15} — 10^{-16} Кл. В этих случаях для измерения заряда частиц используется метод отклонения их в электрическом поле, являющийся развитием метода Милликена, разработанного для определения заряда электрона [82].

Сущность метода состоит в том, что заряженная частица перемещается одновременно под действием сил тяжести и искусственно созданного электрического поля, направленного против силы тяжести либо перпендикулярно к ней. По смещению частицы под действием этих двух сил можно судить о величине заряда частицы.

При использовании электрического поля, направленного против силы тяжести, можно измерять заряд частиц размером от 0,3 до 4 мкм. Заряд частиц меньших размеров измерить невозможно из-за броуновского движения. Частицы размером более 4 мкм падают так быстро, что их не удается остановить силой электрического поля. В то же время закон Стокса применим для измерения в атмосфере частиц размером до 40 мкм. К тому же измерения ведутся только для одной частицы и требуют значительного времени.

Применявшийся нами метод Фукса — Петрянова, при котором равномерное электрическое поле действует перпендикулярно к траектории падения частицы в поле тяготения, позволил расширить диапазон измеряемых размеров и зарядов частиц.

На практике равномерное электрическое поле создается между двумя вертикальными, хорошо отполированными пластинами плоского конденсатора. Регистрируемые частицы поступают сверху и, падая под действием силы тяжести, пролетают между пластинами конденсатора. Траектория частицы имеет вид зигзагообразной кривой, горизонтальное отклонение которой пропорционально заряду, а вертикальное смещение — кубу радиуса и плотности частицы. При свободном падении между пластинами плоского конденсатора на частицу

действуют сила тяжести и обратная ей по направлению сила сопротивления воздуха. Так как для рассматриваемых частиц (примерно 50 мкм) справедлив закон Стокса, то

$$mg = 6\pi r\mu v,$$

где m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; r — радиус частицы, м; μ — динамический коэффициент вязкости, Па·с; v — скорость движения частицы, м/с.

Принимая форму частицы сферической, находим

$$r = \sqrt{\frac{9\mu v}{2g(\gamma - \gamma_{\text{сп}})}}.$$

Для частиц, геометрическая форма которых отличается от сферической, следует вводить эквивалентный радиус r_a , т. е. радиус шара, объем которого равен объему данной частицы [83]. Установлено, что, например, для частиц карбида кремния и электрокорунда

$$r_a = 0,442b,$$

где b — наибольшая ширина частицы, м.

Угол наклона α траектории частицы к вертикали определяется соотношением сил электрического поля и тяжести

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{qE}{\frac{4}{3}\pi r_a^3 \gamma g},$$

где E — напряженность электрического поля между пластинами конденсатора, В/м.

Измеряя α и зная размеры и плотность частицы, можно определить ее заряд.

Этот метод позволяет измерять частицы от 1 до 30 мкм при $\gamma = 1000$ кг/м³. Чувствительность метода к заряду составляет 10^{-17} Кл. Точность полученных результатов зависит от суммы погрешностей при определении составляющих скорости и приложенных сил. При измерении размеров частиц максимальная ошибка не превышает $\pm 5\%$.

Силу тяжести сферических частиц можно вычислить очень точно (погрешность примерно 1%). Электрическая сила определяется при постоянном заряде частиц напряженностью поля. В приборе напряженность зависит от расстояния между пластинами конденсатора и поданного напряжения. Напряжение контролируется с точностью до 5%, а расстояние между пластинами с точностью до 2%. При определении напряженности поля, таким образом, максимальная ошибка достигает 7%. Так как частицы располагаются только в центре конденсатора, краевым эффектом можно пренебречь и считать поле однородным. Сила трения с хорошим приближением опреде-

ляется формулой Стокса, и можно считать, что силы трения и тяжести указываются без существенной погрешности, а ponderomotorная сила — с погрешностью примерно 7%. Точность полученных результатов, как уже говорилось выше, зависит от суммы погрешностей. Таким образом, максимальная ошибка измерения заряда не превышает $\pm 13\%$.

Метод отклонения заряженной частицы в электрическом поле применяется и для крупных частиц. Несмотря на то, что подвижность крупных частиц обычно мала, благодаря большому заряду они могут заметно смещаться в сильном электрическом поле. Недостатки этого метода — трудоемкость и длительность обработки экспериментальных результатов.

В ряде случаев распределение q/r для большого числа частиц получают, используя метод, предложенный Джиллесли [84]. Сущность его состоит в следующем. Тонкая струя аэрозоля инжектируется в пространство между пластинами плоского конденсатора, к которым приложено напряжение. На электродах закрепляются предметные стекла. Заряженные частицы осаждаются из струи электрическим полем на предметные стекла, распределяясь на них по величине отношения q/r . Размер каждого стекла выбирается таким, чтобы величина q/r была постоянной в пределах заданной погрешности измерения и определялась координатой средней линии пластины. Осажденные на стекла частицы анализируются по фракциям с помощью оптического или электронного микроскопа. Найдя отношение q/r по координате осаждения и определяя размер частиц, нетрудно вычислить их заряд. Данный метод пригоден до концентрации 10^6 — 10^7 частиц/см³, причем частицы могут иметь размеры от 0,1 до 100 мкм. Чувствительность метода к заряду достигает 10^{-18} Кл.

Преимущество этого метода состоит в том, что наряду с высокой чувствительностью к заряду он позволяет анализировать аэрозольные частицы по фракциям.

Следует отметить, что метод Джиллесли имеет и недостатки: заряд частиц определяется косвенно через измерение радиуса частицы, в результате чего возможна значительная погрешность; использование метода предполагает дискретный отбор проб. Дискретный характер измерений, а также длительность микроскопического фракционного анализа осевших на предметные стекла частиц является причиной значительных потерь информации. Максимальная ошибка измерения заряда составляет $\pm 13\%$, а размера частиц $\pm 4\%$.

При измерении электрических зарядов микропорошков различных материалов применялись электростатический вольтметр С-50, однопитные струнные электрометры типа «Вульф» и СГ-1М и заряд-масспектрометр ЗМС-1 для одновременного определения заряда и массы отдельных частиц, а также прибор ЗСП-1, измеряющий q/r .

Применение разных приборов вызвано большим интервалом крупности частиц в исходных порошках, а также разнообразием исследуемых методов зарядания микропорошков.

Экспериментальные установки для определения интегрального заряда. Принципиальная схема измерительного устройства с электростатическим вольтметром С-50 показана на рис. 7. Заряженные частицы исследуемых материалов подаются на

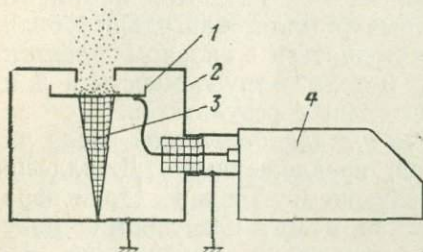


Рис. 7. Измерительное устройство с электростатическим вольтметром:

1 — приемный электрод; 2 — экран; 3 — изолятор; 4 — электростатический вольтметр С-50

металлический диск — приемный электрод, соединенный экранированным проводником с вольтметром С-50. Приемный электрод изолирован от заземленного экранирующего кожуха втулкой из фторопласта-4. Частицы попадают на приемный электрод через отверстие диаметром 10 мм в экране. Края отверстия смазываются клеящим веществом для предотвращения попадания на приемный электрод частиц,

коснувшихся экрана и потерявших в результате этого часть или весь свой заряд.

Сопротивление изоляции электростатического вольтметра составляет примерно 10^{15} — 10^{16} Ом, омическое сопротивление фторопластовых изоляторов — такого же порядка. Суммарная емкость системы приемный электрод плюс электростатический вольтметр равна $2,5 \cdot 10^{-11}$ Ф. Постоянная времени утечки заряда приемного электрода $\tau = 10^{15} \cdot 2,5 \cdot 10^{-11} = 2,5 \cdot 10^4$ с. Допустимое время натекания заряда на приемный электрод равно примерно 250 с, так как за это время стечет не более 1% заряда. На практике время натекания заряда выбирается значительно меньшим (примерно 60 с), так что погрешность измерения за счет стекания заряда практически ничтожна. Общая погрешность измерения, равная 3%, складывается из погрешности измерения потенциала электростатическим вольтметром (1,5%), погрешности измерения емкости системы прибором Е12-1 (0,5%), погрешности взвешивания на аналитических весах АДВ-200 (1%).

Схема измерительного устройства с однопитным струнным электрометром типа «Вульф» показана на рис. 8. Частицы исследуемых порошков попадают на приемный электрод через отверстие в заземленном экране электрометра. Приемный электрод выполнен в виде полированной металлической пластины, на которую помещено предметное стекло. При интегральных измерениях после измерения заряда можно под микроскопом подсчитать число частиц на предметном стекле и

определить точнее, чем при измерении электростатическим вольтметром, средний заряд, приходящийся на отдельную частицу. Наличие при измерении зарядов вблизи электрометра металлических частей, находящихся под высоким потенциалом, не позволяет работать при чувствительности электрометра выше 40—60 дел./В. Погрешность измерения заряда при ра-

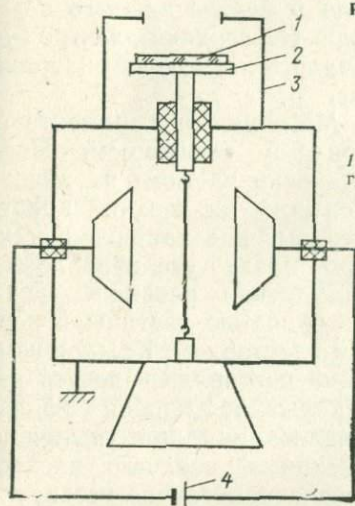
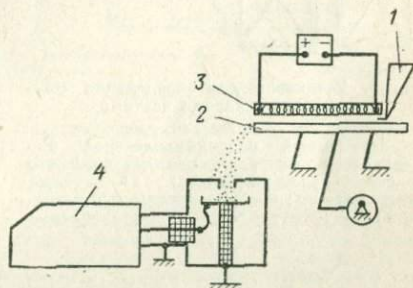


Рис. 8. Измерительное устройство с электрометром типа «Вульф»:

1 — предметное стекло; 2 — приемный электрод; 3 — экран; 4 — батарея БАС-80

Рис. 9. Установка для измерения трибозаряда: 1 — бункер; 2 — вибрируемая плоскость; 3 — нагреватель; 4 — электростатический вольтметр С-50



боте с электрометром составляет 5%. В основном она связана с точностью определения собственной емкости электрометра.

Трибозаряд частиц порошков исследовался на установке, схема которой показана на рис. 9. Частицы исследуемого порошка из бункера подавались на вибрирующую сменную плоскость длиной 150 мм (из латуни, алюминия, винипласта и оргстекла). Металлические плоскости во время измерений заземлялись. Частота колебаний плоскости составляла 32, 52 и 65 Гц, угол наклона плоскости изменялся от 10 до 30°. Для выяснения влияния влажности на величину трибозаряда частиц над зарядной плоскостью устанавливался электрический нагреватель.

Экспериментально максимальный заряд частиц определялся на установке, схема которой показана на рис. 10. Основной ее элемент — горизонтально расположенный воздушный конденсатор с латунными электродами диаметром 60 мм. Верхний электрод изготовлен в виде шарового сегмента с радиусом кривизны 190 мм. Поверхность электродов полировалась по 12 классу точности (размер выступов примерно 6 мкм). Выбранная геометрическая форма верхнего электрода исключала необходимость тщательной параллельно-

сти электродов. В то же время напряженность поля в центре такой системы электродов отличалась от поля плоского конденсатора не более чем на 1%, как это следует из работы [71]. Сферическая частица из магнитного материала устанавливалась в центре нижнего заземленного электрода и удерживалась электромагнитом со стальным сердечником, конец которого имел коническую форму для локализации магнитного

поля в центре нижнего электрода. На верхний электрод подавалось высокое напряжение.

Методика эксперимента состояла в следующем. После установки частицы на нижнем электроде на верхний подавалось высокое напряжение, которое плавно увеличивалось до наступления разряда между поверхностью частицы и верхним электродом. Каждое измерение повторялось десять раз. Напряжение пробоя фиксировалось как при увеличении потенциала верхнего электрода, так и при его уменьшении. В последнем случае устанавливалось напряжение, заведомо превышающее пробойное.

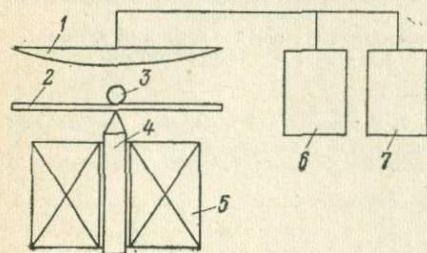


Рис. 10. Установка для определения максимального заряда частиц:

1 — электрод со сферической поверхностью; 2 — заземленный плоский электрод; 3 — сферическая металлическая частица; 4 — сердечник электромагнита; 5 — катушка электромагнита; 6 — высоковольтный источник; 7 — электростатический вольтметр

да, так и при его уменьшении. В последнем случае устанавливалось напряжение, заведомо превышающее пробойное.

Наступление пробоя в межэлектродном промежутке было выбрано в качестве критерия для определения максимального заряда, так как предварительными экспериментами было установлено отсутствие коронного разряда для сферических частиц размером менее 1000 мкм.

Принципиальная схема измерения заряда частиц порошков при контактном способе зарядки показана на рис. 11. Установка состоит из зарядного электрода — металлической плоскости, соединенной с источником высокого напряжения. Частицы исследуемого материала насыпаются тонким слоем на плоскость и заряжаются на ней 2—3 мин, после чего ссыпаются на приемный электрод измерительного устройства. Для направления заряженных частиц в отверстие экрана измерительного устройства применен отклоняющий электрод, на который подается тот же потенциал, что и на зарядный электрод.

Влияние внешних условий (влажности и температуры) на контактный заряд частиц исследовалось на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 12. Исследуемый порошок загружался в шнековый дозатор. Подача порошка регулировалась изменением оборотов двигателя дозатора. Заряжающий электрод выполнен в виде полуцилиндра с никели-

рованной поверхностью радиусом 100 мм. Для фиксирования определенной напряженности поля на поверхности заряжающего электрода соосно с ним установлен второй полуцилиндр меньшего радиуса (50 мм). Внешний электрод заземляется, а на внутренний электрод подается напряжение от высоковольтного источника. Заряжающий электрод устанавливается под углом 20° к горизонтали и может совершать продольные

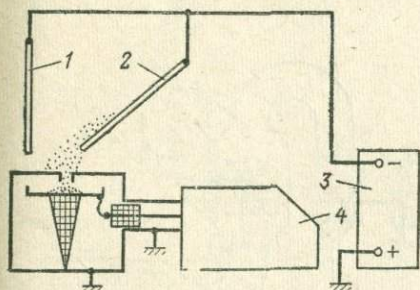


Рис. 11. Установка для измерения заряда частиц при контактном способе заряжения: 1 — отклоняющий электрод; 2 — зарядный электрод; 3 — высоковольтный источник; 4 — электростатический вольтметр С-50

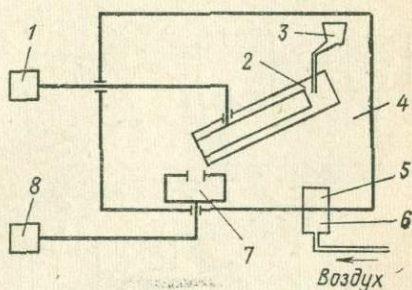


Рис. 12. Установка для изучения влияния внешних условий на контактный заряд частиц:

1 — высоковольтный источник; 2 — зарядный электрод; 3 — шнековый дозатор; 4 — герметичная камера; 5 — воздушный фильтр; 6 — осушитель воздуха; 7 — измерительный цилиндр; 8 — электростатический вольтметр

колебания с амплитудой 0,3 мм с регулируемой частотой. На установке измеряется удельный заряд частиц. С этой целью после заряжения частицы ссыпались в цилиндр Фарадея, а затем взвешивались на аналитических весах АДВ-200.

Заряжающий электрод, шнековый дозатор и цилиндр Фарадея заключены в герметичную камеру для создания контролируемых внешних условий заряжения. В установке можно измерять заряд при относительной влажности от 50 до 100%, при постоянной температуре $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ или при переменной температуре от 20 до 50°C при постоянной влажности. Необходимая влажность атмосферы создавалась путем регулирования подачи воздуха через фильтр с осушителем.

Установка, показанная на рис. 13, применялась для изучения контактного заряжения порошков на сетчатых электродах [73]. Заряжаемый порошок засыпался в бункер с сетчатым дном, на которое подавался потенциал 0—80 кВ от высоковольтного источника. При включении вибратора бункера порошок просыпался через сетку, пролетал через отверстие в металлической пластине с диэлектрической втулкой, установленной под бункером, и собирался на съемный приемный электрод цилиндра Фарадея, соединенный со струнным электрометром.

При исследовании интегрального заряда порошков, приобретаемого ими в кипящем слое, использовалась установка, принципиальная схема которой показана на рис. 14. Камера кипения состоит из трубы диаметром 80 мм, закрытой снизу пористой прокладкой, через которую подается сжатый воздух. Расход воздуха определяется ротаметром РС-5. Поверх пористой прокладки устанавливается латунная сетка с радиально расположенными на ней вертикальными металлическими

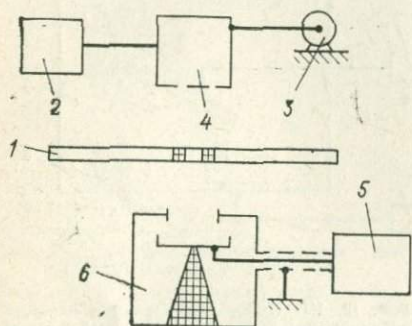


Рис. 13. Установка для изучения контактного заряжения порошков на сетчатых электродах:

1 — дополнительный электрод с диэлектрической втулкой; 2 — высоковольтный источник; 3 — вибратор; 4 — бункер; 5 — электрометр; 6 — цилиндр Фарадея

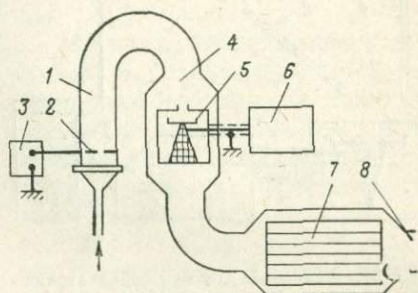


Рис. 14. Установка для измерения заряда частиц в кипящем слое:

1 — камера кипения; 2 — зарядные электроды; 3 — высоковольтный источник; 4 — измерительная камера; 5 — цилиндр Фарадея; 6 — электрометр; 7 — электрофильтр; 8 — выходной патрубок

пластинами для контактного заряжения исследуемых порошков. На высоте 200 мм от дна камеры укрепляются игольчатые электроды для заряжения частиц в поле коронного разряда, а на высоте 100 мм — решетка из прутков диаметром 3 мм для контактного заряжения. На зарядные электроды подается потенциал от высоковольтного источника. Порошок в камеру подается через специальный патрубок. Исследуемый порошок из кипящего слоя через изогнутую трубу подается в измерительную камеру, где находится цилиндр Фарадея, соединенный экранированным проводником со струнным электрометром СГ-1М. На выходе установки установлен электрофильтр для улавливания частиц, не попавших в цилиндр Фарадея. В некоторых опытах воздух перед подачей в камеру кипения осушался и очищался от пыли. Масса попавшего на приемный электрод порошка определялась на аналитических весах АДВ-200. Точность взвешивания составляла 0,1 мг, что позволяет взвешивать порошок в условиях опыта с относительной погрешностью не более 1%. Относительная погрешность измерения потенциала приемного электрода не превышала 3%. При этом не учитывалась погрешность измерения, связанная

с изменением емкости нити, при перемещении ее между электродами электрометра. Суммарная погрешность измерения заряда порошка составляла не более 5%. Результаты измерений обрабатывались по методу наименьших квадратов.

В экспериментальных установках для измерения дифференциального заряда и массы отдельных частиц применялись заряд-масспектрометр ЗМС-1 и проточный заряд-спектрометр ЗСП-1, разработанные и скон-

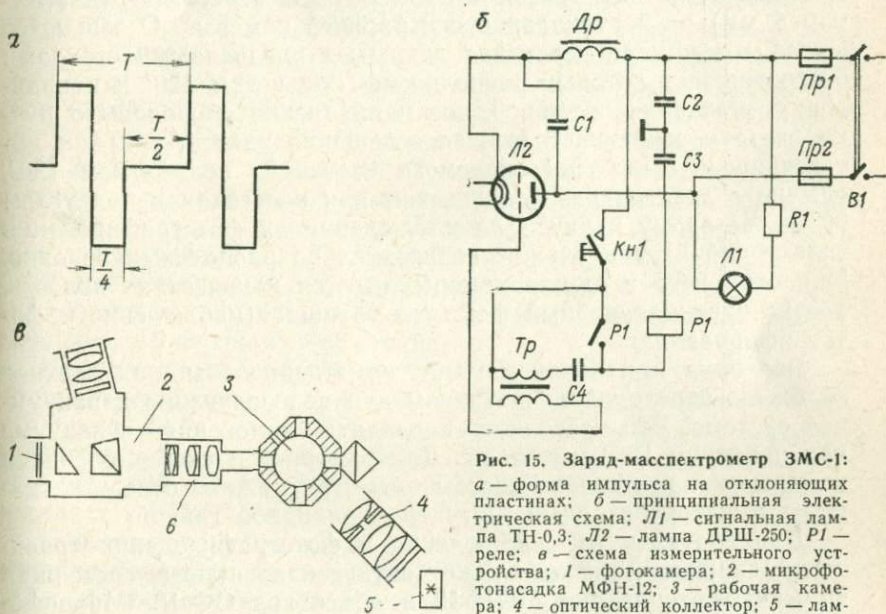


Рис. 15. Заряд-масспектрометр ЗМС-1: а — форма импульса на отклоняющих пластинах; б — принципиальная электрическая схема; Л1 — сигнальная лампа ТН-0,3; Л2 — лампа ДРШ-250; П1 — реле; в — схема измерительного устройства; 1 — фотокамера; 2 — микрофотонасадка МФН-12; 3 — рабочая камера; 4 — оптический коллектор; 5 — лампа ДРШ-250; 6 — объектив ОФ-18

струированные под руководством Д. Н. Лежнина и В. А. Леонова. Принцип действия прибора ЗМС-1 основан на регистрации траекторий частиц при осцилляции их между пластинами плоского конденсатора. В отличие от других установок, предназначенных для указанной цели и работающих на этом принципе, в заряд-масспектрометре применена электронная коммутация импульсов специальной формы.

Заряд-масспектрометр (рис. 15) выполнен в виде двух блоков: измерительного устройства, регистрирующего заряд и массу частиц с фиксацией их траекторий в электрическом поле на фотопленку, и электронного коммутатора, управляющего высоковольтным потенциалом на отклоняющих пластинах рабочей камеры. Электрическая схема прибора показана на рис. 15, б, принципиальная схема измерительного устройства — на рис. 15, в. Основным узлом прибора является рабочая камера, представляющая собой латунный баллон с массивны-

ми стенками. Для создания стабильной температуры внутри камеры с целью исключения конвективных потоков воздуха камера снаружи изолирована пенопластом.

Внутренняя поверхность рабочей камеры выполнена в виде горизонтально расположенного цилиндра, в котором размещены две круглые отклоняющие пластины для создания электрического поля. Отклоняющие пластины установлены параллельно на расстоянии 5 мм, образуя плоский конденсатор. Исследуемые частицы всасываются через два отверстия (диаметром 6 мм) по вертикальной оси рабочей камеры. Освещаются частицы в камере через два закрытых прозрачными стеклами отверстия, ось которых расположена под углом 120° к направлению движения частиц. Такое направление проходящего пучка света обеспечивает лучшее освещение частиц, так как интенсивность света, рассеиваемого частицей под углом 120° , обычно в десятки раз больше, чем при рассеивании под углом 90° к световому пучку. Для наблюдения и фотографирования траекторий частиц служит горизонтально расположенное окно. Напротив него в стенке камеры имеется коническая полость, обеспечивающая черный фон, что улучшает наблюдение и фотографирование.

Все окна в рабочей камере герметизированы, а верхнее снабжено переходным штуцером для подсоединения к вакуумной системе. Это позволяет проводить измерения в вакууме при давлении 10^{-2} мм рт. ст. Для быстрого и удобного снятия камеры при профилактическом осмотре нижнее отверстие камеры имеет переходный штуцер с накидной гайкой.

Для визуального наблюдения и фотографирования траекторий движения частиц служит оптическая система, состоящая из микрофотонасадки МФН-12 и объектива ОФ-18. Микрофотонасадка позволяет фиксировать траектории частиц на фотопленку при помощи фотокамеры и осуществлять визуальное наблюдение через окуляр. Объектив ОФ-18 со светосилой $1:4,5$ и фокусным расстоянием 30 мм установлен так, что его фокальная плоскость проходит через центр рабочей камеры. Входное отверстие фотокамеры разделено на две части. В одну входит пучок света из рабочей камеры, а во вторую проектируется показание счетчика кадров. Такой же счетчик смонтирован на панели управления.

Частицы в ЗМС-1 освещаются шаровой ртутно-кварцевой лампой ДРШ-250 сверхвысокого давления, представляющей собой мощный источник излучения в видимой и ультрафиолетовой частях спектра. Номинальная мощность лампы 250 Вт, световой поток 12 500 лм, частота вспышек 100 Гц. Осветительная лампа оформлена в виде отдельного узла, позволяющего устанавливать ее центр строго по оптической оси в трех координатах. Вентилируется лампа через отверстия в нижней части кожуха и коллектор в верхней части.

Световой пучок в камере создается оптическим коллектором, состоящим из фильтра, трех двояковыпуклых линз и диафрагмы с отверстием диаметром 0,5 мм.

В закрытом виде измерительное устройство оформлено в виде прямоугольника размерами $800 \times 280 \times 550$ мм.

Электронный коммутатор, являющийся автономным блоком заряд-масспектрометра, предназначен для формирования и коммутирования импульсов высокого напряжения. Он обеспечивает ступенчатую регулировку амплитуды выходного напряжения на 100, 500, 1000, 2000 и 3000 В. Напряжение на выходе блока коммутирования имеет такую форму (см. рис. 15, а), которая позволяет устанавливать знак заряда частиц одновременно с определением их массы и величины заряда. Частота следования импульсов изменяется дискретно: 6,25; 12,5; 25 и 50 Гц. Электронный коммутатор и измерительное устройство соединяются кабелями со штепсельными разъемами. Электронный коммутатор питается от сети переменного тока напряжением 220 В. Потребляемая мощность 200 Вт. Габаритные размеры блока коммутирования $550 \times 360 \times 250$ мм³. Измерительное устройство и электронный коммутатор смонтированы на передвижной стойке.

Напряженность электрического поля между пластинами плоского конденсатора рабочей камеры прибора может изменяться от $2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5$ В/м. Заряд-масспектрометр может регистрировать частицы от 0,5 до 30 мкм (при плотности частиц $\gamma = 1000$ кг/м³). Чувствительность прибора к заряду составляет $1,6 \cdot 10^{-17}$ Кл.

Первичная обработка полученных ЗМС-1 фотозаписей состоит в измерении длины двух меток и двух интервалов между ними, составляющих часть траектории частицы, и угла горизонтального перемещения ее к вертикали. Расчетная погрешность измерения радиуса частиц на приборе ЗМС-1 не превышает 5%, а погрешность измерения заряда 15%.

Проточный заряд-спектрометр ЗСП-1, являющийся модификацией лабораторного макета заряд-спектрометра, разработанного во ВНИИ медицинского приборостроения под руководством А. В. Китаева, основан на разделении в электрическом поле частиц аэрозолей в зависимости от отношения q/r .

Прибор ЗСП-1 (рис. 16) состоит из измерительного блока, блока нагнетания, аспирационного блока, высоковольтного источника и парообразователя. Измерительный блок включает: присоединительную камеру для соединения прибора с исследуемым объемом, верхнюю камеру, обеспечивающую ламинарный поток исследуемого аэрозоля, среднюю измерительную камеру, представляющую собой плоский конденсатор, одна из пластин которого (сплошная) заземлена, а на вторую, разделенную на четыре части, подается высокое напряжение от

делителя, нижнюю камеру с осадительными электродами и тканевым фильтром.

Обе пластины конденсатора средней камеры имеют пазы для предметных стекол, на которые осаждается аэрозоль. На выходе измерительной камеры установлен коронирующий электрод, предназначенный для зарядки нейтральных частиц, а также слабо заряженных, миновавших измерительный конденсатор. Частицы аэрозоля, получившие заряд в поле коронного разряда на выходе средней камеры, осаждаются на предметные стекла в нижней камере. Анализом их определяют процент незаряженных и слабо заряженных частиц в общем потоке аэрозоля.

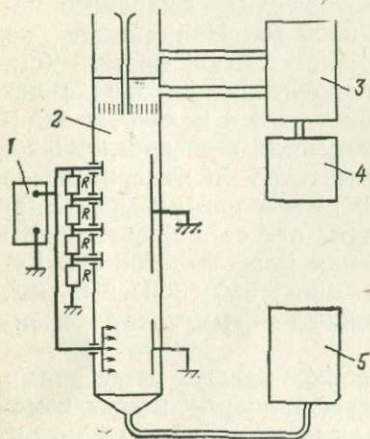


Рис. 16. Проточный заряд-спектрометр ЗСП-1:

1 — высоковольтный источник; 2 — измерительный блок; 3 — блок нагнетания; 4 — парообразователь; 5 — аспирационный блок

Блок нагнетания и аспирационный блок предназначены для создания в измерительном блоке воздушного потока.

Высоковольтный источник (типа ВС-25) служит для подачи через делитель стабилизированного напряжения на пластины измерительного конденсатора. Величина напряжения регистрируется электростатическим вольтметром С-74.

Парообразователь используется для создания атмосферы насыщенного пара в канале измерительной камеры с целью устранения испарения капель исследуемого аэрозоля с жидкой фазой.

Чтобы ускорить фракционный анализ частиц исследуемого аэрозоля на осадительных пластинах, можно использовать автоматический телевизионный счетчик.

Заряд-спектрометр ЗСП-1 регистрирует частицы размером от 0,1 до 100 мкм (при $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$). Чувствительность прибора к заряду составляет 10^{-18} Кл .

Недостатком приборов ЗМС-1 и ЗСП-1 является длительное время обработки информации. Для сокращения времени можно использовать электронные приборы с непосредственной регистрацией результатов измерений.

Приборы ЗМС-1 и ЗСП-1 применялись для изучения различных методов зарядки порошков. Результаты измерений обрабатывались по методу наименьших квадратов.

Принципиальная схема установки для измерения дифференциального заряда микропорошков в поле коронного раз-

ряда показана на рис. 17. Частицы заряжаются в межэлектродном пространстве, образованном заземленным плоским электродом размером 250×300 мм² и рамкой размером 250×250 мм² с натянутыми горизонтально шестью коронирующими проводами диаметром 0,3 мм, расположенными друг от друга на расстоянии 30 мм. Для исключения влияния конвективных потоков воздуха

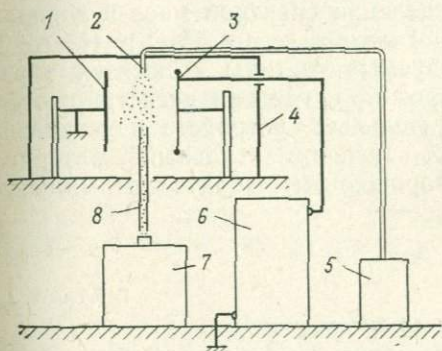


Рис. 17. Установка для измерения заряда порошков в поле коронного разряда:

1 — заземленный электрод; 2 — стеклянный распылитель; 3 — коронирующий электрод; 4 — защитный кожух; 5 — компрессор; 6 — высоковольтный источник АФ-3; 7 — заряд-масспектрометр ЗМС-1; 8 — заборная трубка

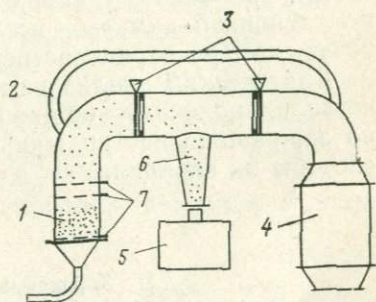


Рис. 18. Установка для измерения заряда, приобретаемого частицами в кипящем слое:

1 — камера кипения; 2 — обходной патрубок; 3 — заслонки; 4 — электрофильтр; 5 — заряд-масспектрометр ЗМС-1; 6 — седиментационная камера; 7 — зарядные электроды

рабочего помещения система электродов размещена в защитном прозрачном колпаке. Частицы в межэлектродное пространство подаются через стеклянный распылитель воздушной струей, создаваемой компрессором. Скорость струи выбиралась такой, чтобы частицы находились в межэлектродном пространстве примерно 1 с. Частицы из межэлектродного пространства отбираются для измерения их заряда через стеклянную трубку диаметром 6 мм, помещенную вблизи заземленного электрода. Для того чтобы в заряд-масспектрометр не попадали частицы, коснувшиеся стенку трубки, ее внутренняя поверхность покрывается клеящим веществом.

Эту же установку можно использовать для изучения заряжения порошков при их распылении. В этом случае применяются сменные распылители различной конструкции [64], а система электродов заземляется.

Дифференциальный заряд микропорошков, приобретаемый в кипящем слое, изучался на установке (рис. 18), аналогичной применяемой для измерения интегрального заряда. При измерении заряда исследуемые частицы из камеры кипения пода-

ются в установленный над прибором ЗМС-1 пробоотборник — горизонтально расположенную трубу, на входе и выходе которой установлены заслонки для регулирования количества отбираемых частиц. Затем заслонки закрываются и порошок из камеры кипения направляется по обходному патрубку в электрофильтр. Из пробоотборника частицы через расположенное внизу отверстие попадают в седиментационную камеру, в которой приобретают равновесные скорости осаждения, что необходимо для определения спектров масс и зарядов частиц при работе с заряд-масспектрометром ЗМС-1. Из седиментационной камеры исследуемые частицы выносятся в рабочую камеру заряд-масспектрометра, где они регистрируются.

Критический анализ измерительных устройств и установок позволил получить обширный экспериментальный материал по заряданию частиц микропорошков и выбрать оптимальные способы их зарядки.

ТАБЛИЦА 1

Характеристика микропорошков

Микропорошок	Плотность, кг/м ³	Размер частиц, мкм	Относительная диэлектрическая постоянная	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
Электрокорунд: ЭБ № М5 ЭБ № М7 ЭБ № М10 ЭБ № М14 ЭБ № М20 ЭБ № М28	3900	—10 —14 —20 —28 —36 —45	5,3	10 ¹² —10 ¹³
Карбид кремния: КЗ № М10 КЗ № М14 КЗ № М20 КЗ № М28	3200	—18 —24 —40 —46	20	10 ⁵ —10 ⁷
Люминофор	3900	—16	8,0	10 ⁸ —10 ⁹
Поливинилхлорид	1400	—200	3,8	10 ¹³ —10 ¹⁴
Поливинилбутираль	1100	—200	3,7	10 ¹⁰ —10 ¹²
Полиэтилен	950	—60	2,5	10 ¹⁴ —10 ¹⁶
Графит	2200	—56	>81	10 ⁻⁴ —10 ⁻³

Примечание. Марки микропорошков электрокорунда и карбида кремния приведены в соответствии с ГОСТ 3647—71.

При интегральном и дифференциальном измерениях применялись микропорошки электрокорунда и карбида кремния различной дисперсности, люминофора, поливинилхлорида, поливинилбутираля, полиэтилена, графита, имеющие различные электрофизические характеристики и различную дисперсность. Плотность, размер частиц, удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость их приведены в табл. 1. Диэлектрическая проницаемость микропорошков определена иммерсионным методом Штарке с использованием прибора, разработанного в Московском государственном педагогическом институте им. В. И. Ленина [85]. Гранулометрический состав определен микроскопическим анализом.

Измерение трибозаряда микропорошков. Интегральный заряд, приобретаемый частицами электрокорунда и карбида кремния при трении их о поверхность различных материалов, измерялся на установке, показанной на рис. 9. В табл. 2 приведены результаты измерения величины и знака

ТАБЛИЦА 2

Интегральный заряд микропорошков при трении о различные материалы,
 $\times 10^{-6}$ Кл/кг

Микропорошок	Материал плоскости			
	медь	алюминий	оргстекло	винипласт
Электрокорунд:				
ЭБ № M10	-0,05	-0,3	-1,4	+0,4
ЭБ № M20	-0,5	-1,7	-8,5	+6,0
ЭБ № M28	-0,6	-0,7	-1,3	+0,2
Карбид кремния:				
КЗ № M10	-0,9	-1,2	-2,5	-0,4
КЗ № M14	-6,2	-3,6	-3,6	-1,2
КЗ № M20	-4,3	-6,6	-5,8	+0,4
КЗ № M28	-3,7	-4,7	-7,6	+9,0

трибозаряда микропорошков при ссыпании последних по плоскостям, изготовленным из диэлектрических и проводящих материалов. Порошки просушивались предварительно в термостате до влажности 0,01—0,03%.

Для микропорошков электрокорунда и карбида кремния всех марок интегральный заряд уменьшается в 2—3 раза при увеличении их влажности до 0,3—0,4%. Нагрев микропорошков до 80—90° С приводит к значительному увеличению интегрального заряда.

Исследовалось также влияние на величину трибозаряда электрокорунда угла наклона плоскости, по которой перемещались микропорошки, длины проходимого частицами пути и частоты вибрации плоскости. Амплитуда колебаний плоскости

составляла 0,5 мм. Наибольшее влияние на величину трибозаряда электрокорунда оказывает длина пути, проходимого частицами по плоскости трения. С увеличением длины пути от 10 до 60 см заряд увеличивается в 4 раза.

Менее резко выражена зависимость величины трибозаряда от угла наклона плоскости. С увеличением угла наклона вибрируемой плоскости от 5 до 20° уменьшается интегральный заряд порошка на 10%.

Влияние частоты вибрации возрастает с увеличением крупности микропорошков. При увеличении частоты вибрации плоскости, по которой движется порошок, от 30 до 60 Гц интегральный заряд электрокорунда ЭБ № М28 увеличивается от 10^{-6} до $2,3 \cdot 10^{-6}$ Кл/кг, а частиц электрокорунда ЭБ № М20 — от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ Кл/кг.

Заряд во всех случаях имел отрицательную полярность. Увеличение длины пути, который проходят частицы по плоскости трения, и частоты ее вибрации приводит к увеличению площади контакта частиц порошков с поверхностью плоскости и, следовательно, к росту интегрального трибозаряда. Увеличение угла наклона плоскости, наоборот, уменьшает общее число контактов частиц с поверхностью трения. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работе А. Леба [63].

Интересные данные получены при изучении электростатического заряжения частиц люминофора при распылении порошка [64]. Порошок люминофора засыпался в распылительный бункер, изготовленный из поливинилхлорида. Распылялся порошок струей сжатого воздуха при расходе 10—15 л/мин и давлении 1—2 кгс/см². Из распылительного устройства взвешенные в воздухе частицы могли подаваться прямо в заряд-масспектрометр ЗМС-1 либо в дополнительный зарядник, в качестве которого использовались изогнутая стеклянная трубка с отверстием диаметром 1 мм и латунная камера с лабиринтом из латунных же пластин. Взвешенные в воздухе частицы люминофора поступали в верхнюю часть латунного зарядника и, проходя через лабиринт, многократно касались его стенок и пластин. Прошедший через зарядник порошок попадал в седиментационную камеру, выполненную в виде заземленной трубы высотой 100 см и диаметром 20 см. Седиментационная камера предназначалась для устранения влияния конвективных потоков воздуха и свободного падения под действием только силы тяжести частиц к моменту их попадания во входное отверстие заряд-масспектрометра.

Все измерения проводились при нормальных условиях (температура 20° С и относительная влажность 80%). Эксперименты показали, что при распылении люминофора струей сжатого воздуха наблюдается практически 100%-ное заряжение ча-

стиц. Степень симметричности заряжения частиц в порошке можно характеризовать соотношением

$$\lambda = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-},$$

где λ — величина, характеризующая отклонение заряжения от симметричного; N_+ — число положительно заряженных частиц; N_- — число отрицательно заряженных частиц.

При симметричном заряжении λ может принимать значение от 0 до 0,1, что соответствует обычному статистическому разбросу результатов измерений. При распылении порошка люминофора из поливинилхлоридного распылителя λ оказалась равной 0,06, т. е. имело место симметричное заряжение. Распыление люминофора стеклянным распылителем также сопровождалось симметричным заряжением частиц ($\lambda=0,1$). При использовании латунного зарядника частицы заряжались преимущественно зарядом положительной полярности ($\lambda=0,44$), что указывает на значительное отклонение распределения зарядов частиц от симметричного. Однако полной униполярности в этом случае получить не удалось.

По экспериментальным данным была определена зависимость заряда частиц от их размера. Оказалось, что эта зависимость может быть аппроксимирована соотношением

$$q = Ar^x,$$

где A — нормировочный множитель.

Показатель степени x при распылении порошков из всех распылителей был равен примерно 2,4, т. е. зависимость заряда частицы от ее размера близка к квадратичной и согласуется со статистической теорией электризации, предложенной Кункелем и Вейсманом [63]. Отклонение от квадратичной зависимости, по-видимому, обусловлено тем, что действительная величина площади поверхности частицы люминофора, имеющей геометрическую форму, отличную от сферической, при увеличении диаметра d растет быстрее, чем площадь поверхности эквивалентной сферы.

Плотность зарядов частиц при распылении порошка люминофора тремя типами распылителей оказалась примерно одинаковой и составляла $(1,1-1,6) \cdot 10^{-7}$ Кл/м². Абсолютная величина заряда частиц при распылении принимала значения от $1,6 \cdot 10^{-17}$ до $1,6 \cdot 10^{-16}$ Кл.

При распылении порошка полиэтилена (ПЭ) величина электрических зарядов на частицах оказывается в несколько раз больше, чем на частицах люминофора. Меньший поверхностный заряд частиц люминофора можно объяснить тем, что при разрыве контактов при распылении процессы разрядки протекают более интенсивно в случае полупроводящего материала (люминофора). В результате остаточный заряд на части-

цах люминофора оказывается намного меньше начального заряда.

Интегральный и дифференциальный заряды частиц порошков в поле коронного разряда измерялись на установке, показанной на рис. 17. При интегральных измерениях вместо прибора ЗМС-1 использовалось измерительное устройство с электрометром типа «Вульф» (см. рис. 8).

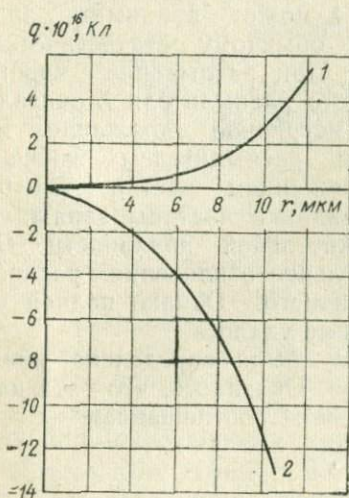


Рис. 19. Зависимость заряда q частиц электрокорунда от их эквивалентного радиуса r :

- 1 — распыление в отсутствие поля;
2 — распыление в поле коронного разряда

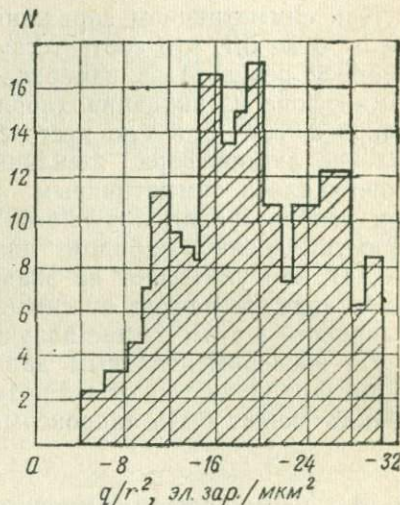


Рис. 20. Распределение числа частиц N в зависимости от величины q/r^2 при зарядании их в поле коронного разряда

Зарядке подвергались частицы электрокорунда. В этих экспериментах расстояние между коронирующим и осадительным электродами принималось 60 мм. Потенциал на коронирующем электроде — отрицательный, равный 35 кВ, при этом ток составлял 0,025 мА/м. Так как при исследовании зарядания частиц абразива в поле коронного разряда порошок предварительно распылялся из стеклянного распылителя, то заряд, приобретаемый частицами при трении о стенки распылителя, измерялся в отсутствие поля. Трибозаряд всех зарегистрированных частиц оказался положительным.

В поле коронного разряда при прохождении ионизированного межэлектродного пространства частицы электрокорунда перезаряжались, и знак заряда становился отрицательным, т. е. соответствовал знаку потенциала коронирующего электрода. Связь между зарядами и размерами частиц показана на рис. 19. Верхняя половина графика (положительная область) ил-

люстрирует зарядание частиц микропорошка электрокорунда при распылении, а нижняя (отрицательная область) — дает представление о величине заряда, приобретаемого частицами в поле коронного разряда.

Все частицы приобретают отрицательный заряд при пролете 250 мм в межэлектродном пространстве. При пролете первых 80 мм 40% частиц не успевают перезарядиться и сохраняют положительный заряд.

Для выяснения закономерностей изменения зарядов частиц определены средние экспериментальные результаты; для характеристики случайных колебаний использована величина $q/r^2_{\text{ЭКВ}}$. График повторяемости различных значений $q/r^2_{\text{ЭКВ}}$ показан на рис. 20. Получить плавные кривые распределения можно только при очень большом числе экспериментальных данных. Поэтому чаще всего приходится пользоваться гистограммами пилообразного вида. Для сглаживания и аппроксимирования исходных данных удобно использовать вероятностную сетку [86]. В результате соответствующих построений найдено, что значения $q/r^2_{\text{ЭКВ}}$ в первом приближении распределяются нормально. Из этого следует, что параметры распределения можно получить с помощью вероятностной сетки даже при сравнительно большом случайном разбросе исходных данных.

Ввиду того что микропорошки электрокорунда ЭБ № М20 и ЭБ № М28 содержат частицы крупнее 20 мкм, измерение зарядов этих частиц приводилось также с помощью электрометра. Интегральный заряд порошка ЭБ № М20 оказался равным $2 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, а порошка ЭБ № М28 — $1,7 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. При определении заряда, приходящегося на одну частицу, из данных интегральных измерений вычислялся средний размер частиц \bar{d} (в мкм)

$$\bar{d} = \frac{\sum_i n_i d_i}{\sum_i n_i},$$

где n_i — число частиц данного размера; d_i — размер частиц i -го сорта, мкм.

Для микропорошка ЭБ № М28 \bar{d} равно 17,6 мкм, а для ЭБ № М20 — 10,6 мкм. Средние заряды, приходящиеся на одну частицу, соответственно равны $4,3 \cdot 10^{-15}$ и $1,1 \cdot 10^{-15}$ Кл.

В работе [87] приведены данные по зарядке частиц дибутилфталата размером 0,2—4 мкм при напряженности поля коронного разряда 1, 3 и 5 кВ/см в условиях получения ими зарядов, близких к предельному. Экспериментальная зависимость заряда от размера частицы хорошо согласуется с теоретической кривой, рассчитанной по методике, приведенной в работе [67].

Для порошков поливинилбутираля (ПВБ), поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ) изучалась зависимость средней плотности заряда частиц от напряженности электрического поля коронного разряда, величина которой изменялась от 1 до 5 кВ/см. Средняя плотность заряда частиц этих материалов составляла $(1-3)10^{-7}$ Кл/м², т. е. на порядок ниже максимально возможной плотности заряда, рассчитанной теоретически. Полученными экспериментальными данными установлена тенденция к насыщению плотности заряда частиц у ПЭ и ПВБ при напряженности поля, начиная с 3—4 кВ/см. Микроскопический анализ показал, что частицы ПЭ и ПВБ имеют неправильную геометрическую форму с острыми выступами в отличие от ПВХ, форма частиц которого близка к сферической. Поэтому можно предположить, что наблюдаемое насыщение при таких низких значениях средней напряженности поля коронного разряда вызвано стеканием заряда с острых выступов поверхности частиц в результате локального газового разряда.

Различие между экспериментальными и расчетными значениями средней плотности заряда частиц, по-видимому, объясняется тем, что, как показано в работе [88], при наличии в межэлектродном пространстве большого числа частиц время, необходимое для приобретения частицами максимального заряда, значительно возрастает, достигая, например, 0,5 с при относительной запыленности воздуха, равной 1, т. е. увеличивается в несколько раз по сравнению с заряданием одиночной частицы.

Измерение заряда при контактном способе зарядания позволило выяснить величину максимальных зарядов и влияние различных факторов на процесс зарядания частиц микропорошков. Влияние на величину заряда размера частиц и напряженности внешнего электрического поля изучалось на установке, показанной на рис. 10. Плоский конденсатор с электродами размером, значительно превосходящим межэлектродное расстояние, является удобной системой для исследования контактного зарядания. В этом случае напряженность поля в центре конденсатора вычисляется довольно просто, что важно для установления закономерностей зарядания частиц в электрическом поле.

Заряд (в Кл) сферической проводящей частицы, находящейся в стационарном состоянии на заряжающем электроде, определяется выражением

$$q_{\text{расч}} = \frac{2\pi^3}{3} \epsilon_0 r^2 E_{\text{пл}}, \quad (12)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; $E_{\text{пл}}$ — пробивная напряженность поля в плоском конденсаторе, В/м.

Для выяснения области практического применения формулы

(12) измерялся заряд сферических проводящих частиц, изготовленных из индия, различной дисперсности при различных значениях напряженности электрического поля в конденсаторе [89]. Заряд частиц линейно увеличивался с ростом напряженности поля до пробоя межэлектродного промежутка, как и следует из формулы (12) (рис. 21). Однако во всех измерениях величина заряда оказывалась меньше $q_{\text{макс}}$. Расхождение экспериментальных и расчетных значений зарядов не зависело от напряженности электрического поля, а являлось функцией размера r частиц. Отношение измеренного заряда к расчетному аппроксимируется аналитической зависимостью вида

$$q_{\text{экс}} = q_{\text{расч}} (1 - e^{-c_1 r}), \quad (13)$$

где $q_{\text{экс}}$ — экспериментальное значение заряда частицы, Кл; $q_{\text{расч}}$ — расчетное значение заряда частицы, Кл; c_1 — константа (для частиц индия $c_1 = 0,28 \text{ м}^{-1}$).

Таким образом, для частиц радиусом менее 1000 мкм зависимость их заряда от размера представляет сложную функцию типа $r^2(1 - e^{-c_1 r})$. Можно предположить, что расхождение между расчетной величиной заряда и найденной экспериментально вызвано недостаточным временем контакта частицы с зарядной плоскостью, так как частица осциллирует между пластинами конденсатора. На поверхности электрода и частицы присутствуют тонкие пленки окислов или загрязнений, которые уменьшают электропроводность в месте контакта.

Влияние поверхностных загрязнений на динамику зарядки частицы оценить трудно, поэтому влияние времени контакта на величину заряда определялось экспериментально путем изменения частоты осцилляции частицы. С этой целью использовались стальные шарики радиусом 275 мкм, которые дополнительно удерживались на нижнем электроде постоянным магнитным полем. Результаты эксперимента подтвердили в значительной степени зависимость величины заряда от времени контакта частицы с электродом: при изменении частоты осцилляций частицы от 0 до 100 Гц ее заряд уменьшался в 2—3 раза.

В работе [71] установлено, что при отсутствии дополнительной удерживающей силы частица отрывается от нижнего электрода, когда ее заряд еще не достиг максимального значения. Величина сцепления частицы с электродом определяется кулоновской силой отталкивания, гравитационной и молекулярной силами и силой притяжения, связанной с возникновением двойного электрического слоя на границе контакта. Представ-

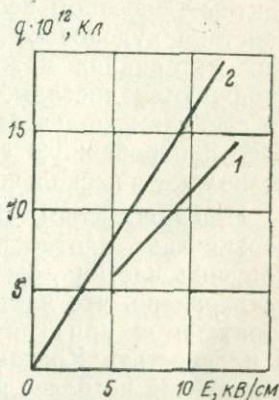


Рис. 21. Зависимость заряда q сферической частицы радиусом 305 мкм от напряженности E электрического поля:

1 — экспериментальная; 2 — расчетная

ляет интерес соотношение кулоновской силы отталкивания, рассчитанной для напряженности поля, равной пробивной, и противоположно направленной ей гравитационной силы. Для частиц радиусом 100 мкм кулоновская сила на два порядка превышает гравитационную силу, удерживающую частицу на электроде, и ее роль увеличивается с уменьшением размера частиц. Поэтому для более эффективной зарядки частиц контактным способом необходимо изыскивать методы компенсации действия кулоновской силы отталкивания. Для частиц магнитных материалов можно применять магнитное поле. Если же заряжаются частицы, не обладающие магнитными свойствами, то следует использовать для их удержания на зарядном электроде центробежную силу, воздушный поток и т. д. Эти меры позволяют в несколько раз увеличить заряд частиц.

При контактном способе зарядания проводящих частиц поверхностная плотность максимального заряда, который может получить частица, составляет $(3,9-5,0) \cdot 10^{-5}$ Кл/м². Кроме того, установлено, что частицы радиусом менее 30 мкм эффективнее заряжаются при контакте со сферическими электродами, чем с плоскостью. Контактный заряд частиц неправильной формы отличается не более чем на 10% от заряда сферических частиц с радиусом, равным половине линейного размера несферической частицы.

Следует подчеркнуть, что полученные выше соотношения справедливы для частиц, находящихся в неподвижном состоянии на зарядном электроде. В условиях же электроклассификации после зарядания частицы подаются в рабочую зону классификатора, при этом частица отрывается от электрода и попадает в газовую среду. Процесс отрыва частицы от электрода сопровождается перераспределением заряда на ее поверхности, разрывом двойного электрического слоя и изменением емкости частицы. Эти и другие факторы влияют на абсолютную величину заряда частицы. Было определено, что отношение максимального остаточного заряда частиц при контактном способе зарядания к наибольшему заряду частиц таких же размеров в воздухе зависит от радиуса частиц. Например, для частиц радиусом 6 мкм это отношение составляет 0,32, а для частиц радиусом 400 мкм — 0,6.

Не меньший интерес представляет экспериментальное изучение контактного зарядания диэлектрических и полупроводящих частиц, наиболее часто подвергающихся электрической классификации. При этом для правильного выбора параметров процесса классификации желательно знать поверхностную плотность заряда на частицах, зависимость заряда от величины и полярности потенциала зарядного электрода, влияние внешних условий на величину заряда частиц.

Существуют две точки зрения на механизм зарядания ди-

электриков при контакте с металлической пластиной, на которую подается высокий потенциал [63].

Первая состоит в том, что в результате поляризации диэлектрика в узком зазоре между диэлектрической частицей и зарядной пластиной возникает сильное электрическое поле, которое может вызвать переход электронов из металла в диэлектрик, если пластина заряжена отрицательно, или переход небольшого числа положительных носителей заряда в металл из диэлектрика при наличии в последнем дефектов или примесей. Поскольку в любом случае концентрация свободных электронов в металле больше концентрации возможных носителей в диэлектрике, то зарядание диэлектриков должно быть несимметричным относительно знака потенциала зарядной пластины.

Так как переход зарядов в диэлектрик и из него будет ограничен небольшим числом поверхностных уровней в диэлектрике (уровней дефектов или примесей), то для данного материала поверхностная плотность заряда должна оставаться постоянной с увеличением площади контакта. Полный заряд образца в этом случае должен быть пропорциональным площади контакта и не зависеть от высоты образца.

Другая точка зрения основана на том, что между частицей и зарядной пластиной происходит перераспределение зарядов вследствие конечной проводимости частицы. В этом случае полный заряд должен увеличиваться пропорционально напряженности поля и зависеть от площади контакта и от высоты образца. Кроме того, заряд должен нарастать в течение некоторого промежутка времени с момента контакта с зарядной пластиной и быть симметричным относительно знака потенциала.

Эксперименты по заряданию диэлектрических образцов при температуре 20°C и относительной влажности 70% показали, что заряд линейно зависит от потенциала зарядной плоскости и симметричен относительно знака потенциала. Зависимость величины заряда (в Кл) образца от времени контакта с зарядной плоскостью с достаточной степенью точности описывается уравнением

$$q = q_{\text{макс}} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{\tau}} \right), \quad (14)$$

где $q_{\text{макс}}$ — максимальный заряд образца, Кл; t_k — время зарядания образца, с; τ — постоянная времени перераспределения заряда между плоскостью и образцом, с.

Независимо от площади контакта образца и зарядной пластины поверхностная плотность заряда оказалась одинаковой для образцов с различной поверхностью. При потенциале зарядного электрода 25 кВ поверхностная плотность заряда равна $2,3 \cdot 10^{-6}$ Кл/м².

Экспериментальные данные указывают на то, что при нормальных условиях внешней среды диэлектрические частицы заряжаются за счет их конечной проводимости в результате

наличия на поверхности частиц пленки влаги, а также загрязнений.

Рассмотренные выше закономерности контактного заряжения проводящих и диэлектрических образцов могут быть использованы при проектировании зарядных устройств и для анализа экспериментальных результатов по заряданию частиц конкретных порошковых материалов.

Для измерения заряда диэлектрических порошков при контактном способе зарядания применялось устройство, показанное на рис. 11. Контакт с металлической плоскостью, находящейся под высоким потенциалом, заряжались микропорошки электрокорунда ЭБ № М20 и ЭБ № М28. На плоскость подавался потенциал до 10 кВ. После зарядания в течение 2–3 мин частицы ссыпались с плоскости в измерительное устройство. Полярность подаваемого на плоскость потенциала выбиралась отрицательной, чтобы избежать перезарядки частиц при удалении их с зарядного электрода (частицы электрокорунда при трении о медную плоскость имели отрицательный заряд).

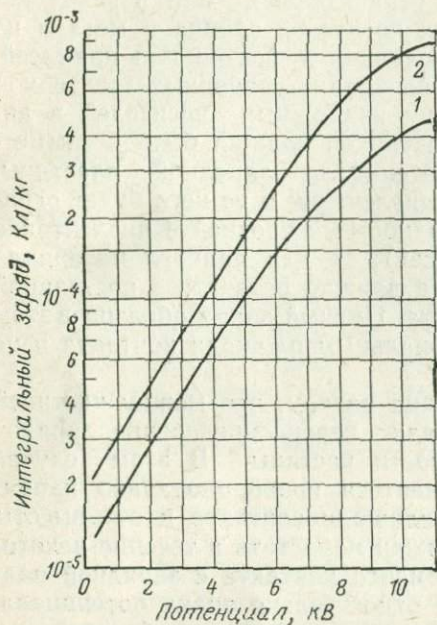


Рис. 22. Интегральный заряд электрокорунда при контактном способе зарядания: 1 — порошок ЭБ № М20; 2 — порошок ЭБ № М28

На рис. 22 показаны результаты измерения интегрального заряда микропорошков электрокорунда при контактном способе зарядания. Для каждого значения потенциала проводилось двадцать измерений интегрального заряда и определялась средняя величина. Оказалось, что заряд, приобретаемый частицами электрокорунда при контактном способе зарядания, на три порядка больше их трибозаряда.

Исследование влияния внешних условий на зарядание частиц имеет большое значение для отработки технологических процессов с применением электрогазодинамических методов. Зарядание порошков различной электропроводности при изменении параметров внешней среды — влажности и температуры — изучалось В. А. Леоновым и А. А. Гуревич на специально сконструированной установке, показанной на рис. 12 [64]. В качестве исследуемых образцов использовались порошки мела, люми-

пофора и графита. Для исключения влияния зарядов трения на контактный заряд порошков предварительно измерялся заряд частиц в отсутствие внешнего поля. Для мела и графита его полярность оказалась отрицательной, а для люминофора — положительной.

При исследовании влияния влажности окружающей среды на контактный заряд порошков напряженность поля между электродами составляла 5,1 и 7,2 кВ/см. Эксперименты позволили установить, что заряд частиц растет с увеличением влажности окружающей среды. Относительное увеличение заряда для разной напряженности поля примерно одинаково и составляет 50% при увеличении влажности от 50 до 100%. Для гигроскопических материалов (мела) влажность на величину заряда не влияет. Можно предположить, что на поверхности частиц образуется пленка влаги, толщина которой определяется относительной влажностью среды. Поскольку удельное объемное сопротивление воды значительно меньше, чем у материала порошков, переход зарядов происходит в основном на поверхность частиц.

При исследовании зависимости контактного заряда порошков люминофора и графита от температуры установлено ярко выраженное уменьшение заряда с увеличением последней от 20 до 50°С примерно на 30%. Уменьшение зарядов может быть обусловлено увеличением поверхностного сопротивления частиц. Заряд же мела незначительно увеличивался вследствие лучшей дезагрегации порошка.

Заряжание порошков на сетчатых электродах, находящихся под высоким потенциалом, изучалось на установке, показанной на рис. 13 [73]. Исследование проводилось на порошке индия, по составу близком к монодисперсному и состоящем из сферических частиц со средним размером $\bar{d}=125$ мкм, порошках меди, никеля и алюминия, имевших средние размеры соответственно 9, 5 и 13 мкм, а также на порошках полупроводящих и диэлектрических материалов (люминофор, электрокорунд и поливинилбутираль). Сферические частицы меди и никеля получались распылением этих металлов с помощью электрического разряда между электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость.

Для получения небольших количеств сферических частиц была разработана малогабаритная полуавтоматическая установка [90], схематически показанная на рис. 23. Основной узел установки — прозрачная кювета размерами $0,2 \times 0,2 \times 0,3$ м³. В кювете установлены два взаимно перпендикулярных электрода-разрядника, изготовленных из металла, который необходимо распылить. Вертикальный электрод может перемещаться в горизонтальном направлении микрометрическим винтом. Горизонтальный электрод передвигается по вертикали механизмом возвратно-поступательного перемещения. Этот механизм выпол-

нен в виде укрепленной на крышке кюветы полой стойки, внутри которой размещена червячная передача с приводом от электродвигателя постоянного тока. Горизонтальный электрод присоединен к вертикальным стержням из фторопласта-4, связанным с червячной передачей. Возвратно-поступательное перемещение горизонтального электрода обеспечивает равномерное распыление всей поверхности вертикального электрода. Скорость перемещения горизонтального электрода регулируется в зависимости от мощности разряда и вида распыляемого материала в пределах 0,6—2 мм/с; управление установкой осуществляется с выносного пульта.

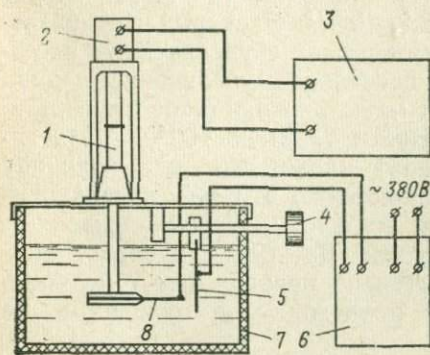


Рис. 23. Блок-схема установки для получения сферических металлических частиц: 1 — червячный механизм; 2 — электродвигатель; 3 — пульт управления; 4 — микрометрический винт; 5 и 8 — электроды; 6 — батарея конденсаторов; 7 — кювета

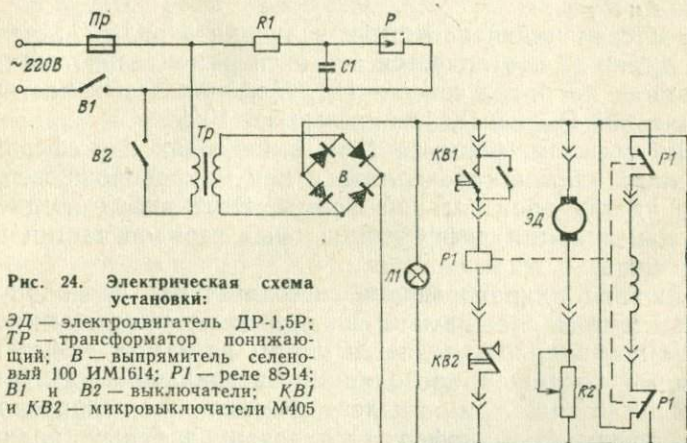
Электрическая схема устройства показана на рис. 24. Направление движения горизонтального электрода изменяется установленными в верхнем и нижнем крайних положениях электрода микровыключателями, от которых срабатывает реле, переключающее полярность питания обмотки электродвигателя. Разряд между электродами создается параллельным подключением конденсаторов общей емкостью 200 мкФ. В кювету заливается около 6 л диэлектрической жидкости, в качестве которой использовали дистиллированную воду и этиловый спирт.

Методика получения сферических частиц заключается в следующем. Кювета заполняется диэлектрической жидкостью, электроды устанавливаются на расстоянии 10 мм друг от друга. Затем подается рабочее напряжение, и микрометрическим винтом электроды сближаются до тех пор, пока не появятся вспышки разряда. Далее включается механизм перемещения горизонтального электрода. После нескольких часов работы жидкость осторожно удаляется из кюветы. Осевшая на дно кюветы крупная фракция промывается этиловым спиртом и затем высушивается. Жидкость со взвешенными в ней мелкими частицами заливается в отстойник для разделения мелких фракций седиментацией. Спектр получаемых частиц по размерам носит полидисперсный характер, причем большинство частиц имеет диаметр менее 2 мкм. Распределение по размерам частиц, получаемых с помощью электрического разряда, аппроксимируется аналитической зависимостью вида

$$N = Ad^B,$$

где N — содержание частиц заданного размера, % общего числа зарегистрированных частиц; A и B — коэффициенты; d — диаметр частицы, мкм.

Коэффициенты A и B определены методом наименьших квадратов; величина их: для никеля $A=50,2$; $B=-0,75$; для меди $A=50,6$; $B=-0,8$.



Экспериментальная величина интегрального заряда порошка индия при потенциале сетки 5 кВ $Q_{\text{экс}} = 4,3 \cdot 10^{-6}$ Кл/кг. Порошок никеля, состоящий из частиц неправильной формы с широким диапазоном размера частиц, заряжался при различных потенциалах сетки (от 0 до 20 кВ). Интегральный заряд частиц никеля линейно зависит от потенциала сетки, при этом процесс зарядания носит симметричный характер относительно полярности сеточного потенциала.

Представляет интерес сравнение экспериментальных значений интегральных зарядов проводящих частиц с величинами зарядов, рассчитанными по формуле, предложенной В. И. Коряковым [73]

$$q_{\text{расч}} = \frac{\epsilon_0 E_{\text{сет}} r^2 \ln^2 \frac{1}{r}}{3} f(b, d_c, r), \quad (15)$$

где $E_{\text{сет}} = \frac{2\pi C U_c}{S}$ — напряженность поля сетки, В/м; C — емкость системы сетка — бункер, Ф; U_c — потенциал сетки, В; S — площадь сетки, м²; b — расстояние между осями прутков сетки, м; d_c — толщина прутков сетки, м;

$$f(b, d_c, r) = \frac{4 \left[1 + \frac{16}{3\pi^2} \left(\frac{b}{r} - \frac{d_c}{2r} - 1 \right) \right]}{\pi \sqrt{\left(\frac{b}{r} \right)^2 - 1}}$$

По формуле (15) определяют средний заряд одной частицы. Интегральный заряд (в Кл/кг) порошка находят по уравнению

$$Q_{\text{расч}} = q_{\text{расч}} N,$$

где $N = \frac{3}{4\pi r^3 \gamma}$ — число частиц в 1 кг порошка.

Для частиц индия расчетная величина заряда $Q_{\text{расч}} = 4,35 \times 10^{-6}$ Кл/кг, т. е. отличается от экспериментально определенного заряда не более чем на 1%. Для никелевых частиц разброс значений $Q_{\text{расч}}$ и $Q_{\text{экс}}$ не превышает 10%.

Таким образом, формула (15), выведенная для сферических проводящих частиц, справедлива и для микропорошков, состоящих из частиц произвольной формы. Этот вывод подтверждается и измерениями дифференциальных зарядов частиц порошка алюминия.

Заряжание микропорошков, состоящих из проводящих частиц, контактом с сетчатыми электродами, находящимися под высоким потенциалом, является одним из самых эффективных.

Помимо порошков проводящих материалов на сетчатых электродах заряжались диэлектрические и полупроводящие микропорошки (люминофор, электрокорунд белый, поливинилбутираль и поливинилхлорид). В процессе измерений влажность окружающей среды поддерживалась в пределах 60—70% при температуре 16—18°С. Дифференциальные заряды частиц измерялись прибором ЗМС-1.

Для всех материалов наблюдалось пропорциональное увеличение заряда частиц с ростом потенциала сетки U_c (до величины 5—8 кВ), после чего обнаружена тенденция заряда к насыщению.

Заряд частиц в зависимости от их размера при постоянном потенциале сетки растет быстрее, чем r^2 , что характерно и для зарядов частиц проводящих материалов. Однако наблюдается больший разброс значений зарядов частиц одинаковых размеров, чем при заряжении проводящих частиц. Этот разброс обусловлен тем, что при просыпании порошка через сетку максимальный заряд приобретают лишь те частицы, которые коснулись прутков сетчатого электрода.

Обнаруженное сходство в характере заряжения проводящих, полупроводящих и диэлектрических частиц позволяет предположить, что процесс заряжения двух последних материалов связан с некоторой поверхностной проводимостью частиц.

Максимальная плотность зарядов равна: для люминофора $2,3 \cdot 10^{-7}$ Кл/м², для электрокорунда $2,2 \cdot 10^{-7}$ Кл/м², для поливинилбутирала и поливинилхлорида $(1,1—1,2) \cdot 10^{-7}$ Кл/м², что в несколько раз меньше максимальной плотности заряда проводящих частиц (при U_c 5—10 кВ).

Установлено, что время, необходимое для сообщения частицам диэлектрика и полупроводника максимального заряда при нормальных условиях внешней среды, не превышает 30 с.

Заряд, получаемый частицами при контакте с сетчатым электродом, можно значительно увеличить, устанавливая под сеткой дополнительную металлическую пластину. Интегральный заряд порошка в этом случае, как показали опыты со сферическими частицами меди, находится как суперпозиция интегрального заряда от сетчатого электрода и заряда, приобретаемого порошком в поле плоского конденсатора, образованного сеткой и дополнительной пластиной. Наилучшие условия зарядания микропорошков создаются при использовании сетчатого электрода с ячейками, соизмеримыми с размером частиц.

Более полно контактный способ зарядания изучен при электризации частиц в кипящем слое.

Измерение заряда микропорошков, выносимых из кипящего слоя, необходимого для их электроклассификации, представляет большой интерес. Опубликованные результаты исследований [91] в основном касаются физико-механических процессов в кипящем слое. В работе [92] изучалась электризация металлических деталей, соприкасающихся с кипящим слоем, в статье [93] сообщается о влиянии температуры на электризацию частиц речного песка и кварцевого стекла в слое. Размер частиц песка составлял 280 мкм, а шариков кварцевого стекла 190—200 мкм. Температура кипящего слоя изменялась в пределах 20—240° С. К сожалению, в опытах измерялся не заряд порошков, а потенциал слоя. С ростом температуры потенциал слоя увеличивается вследствие увеличения поверхностного сопротивления частиц, достигая максимума (примерно 8000 В) при температуре 100—120° С. Затем он заметно снижается, так как поверхностное сопротивление значительно уменьшается при дальнейшем росте температуры. При этом начинает влиять утечка зарядов в случае разделения соприкасающихся поверхностей.

Электризация полимерных порошков при псевдооживлении рассмотрена А. Ф. Климович [94]. Для исследований были выбраны порошки: полиэтилена, поливинилбутираля, поликапроамида, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида и фторопласта Ф32Л с частицами размером от единиц до сотен микрон. Исследование электризации этих порошков показало, что при прочих равных условиях полярные полимеры получают более высокие электрические заряды, чем неполярные. Кроме того, исследовалась эффективность зарядных электродов разной конструкции: перфорированных и сетчатых пластин, ленточных электродов различной конфигурации и игольчатых электродов. Установлено, что эффективность указанных электродов одинакова, и зарядание происходит в основном в результате контакта частиц порошков с зарядными электродами.

И в этих исследованиях заряд частиц непосредственно не измерялся, а степень электризации порошков определялась по вторичным эффектам: количеству осевшего на подложке порошка, току в межэлектродном пространстве, потенциалу на коллекторе, продолжительности электроосаждения и т. д.

Непосредственное определение зарядов частиц микропорошков в процессе кипения в литературе освещено недостаточно.

Результаты исследований, приведенные ниже, позволили установить зависимость величины заряда частиц микропорошков диэлектрических и полупроводящих материалов от интенсивности процесса кипения, влажности и температуры порошка, продолжительности кипения, дисперсности материала и способа зарядания.

Интегральный заряд частиц определялся на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 14. При исследовании дифференциального заряда частиц использовалась установка, показанная на рис. 18 [95]. В ряде опытов вместо прибора ЗМС-1 применялся заряд-спектрометр ЗСП-1. Интегральный и дифференциальный заряды определялись на микропорошках электрокорунда и карбида кремния различной дисперсности и порошке поливинилбутирала (ПВБ). Выбор этих материалов обусловлен тем, что электрокорунд и поливинилбутираль являются типичными диэлектриками, а карбид кремния — полупроводником. Это позволило проследить зависимость заряда частиц от электрофизических свойств диспергируемых в кипящем слое материалов.

В предварительных экспериментах при измерении интегрального заряда определялся знак электростатического заряда частиц при кипении порошков в камере, изготовленной из оргстекла и винипласта. В установку загружался порошок, объем которого был постоянным и равным 400 см^3 . Скорость воздуха в камере кипения поддерживалась 20 см/с . Установлено, что частицы электрокорунда и карбида кремния, выносимые из кипящего слоя, заряжались преимущественно положительно, в то время как частицы ПВБ заряжались в основном отрицательно.

Интегральный заряд частиц микропорошков, выносимых воздухом из кипящего слоя, зависит от влажности порошка в камере кипения, увеличивающейся с увеличением времени хранения порошка на воздухе после просушки (табл. 3). Интегральный заряд микропорошков электрокорунда и карбида кремния всех марок уменьшается при увеличении их влажности. С изменением влажности микропорошка на $0,1\%$ изменяется величина интегрального заряда в среднем на $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/кг}$.

Увеличение интегрального заряда по мере роста крупности порошков объясняется тем, что при постоянном расходе воздуха у крупных порошков имеет место более интенсивное кипение, при этом аутогезия крупных частиц меньше, чем мелких.

Зависимость интегрального заряда от влажности порошка электрокорунда

Марка порошка	Интегральный заряд, Кл/кг	Влажность порошка, %
ЭБ № М5	+7,8 · 10 ⁻⁵	0
	+1,2 · 10 ⁻⁵	0,39
ЭБ № М7	+9,0 · 10 ⁻⁵	0
	+1,7 · 10 ⁻⁵	0,41
ЭБ № М10	+1,1 · 10 ⁻⁴	0
	+5,5 · 10 ⁻⁵	0,45
ЭБ № М20	+1,4 · 10 ⁻⁴	0
	+8,4 · 10 ⁻⁵	0,28
	+5,2 · 10 ⁻⁵	0,48

Результаты измерения интегрального заряда микропорошков электрокорунда и карбида кремния в зависимости от времени пребывания в камере кипения показаны на рис. 25. Порошок предварительно просушивался при температуре 200°С в течение 4 ч. Температура порошка, направляемого в камеру кипения, составляла 100°С. В этих экспериментах воздух в камеру подавался неосушенным. Снижение температуры порошков приводит к уменьшению интегрального заряда. Это подтверждается и результатами измерений дифференциальных зарядов частиц при различной температуре порошков. На рис. 26 показана величина дифференциальных зарядов частиц карбида кремния, измеренных при температуре порошка 100 и 25°С. При 100°С преобладает заряд частиц положительной полярности. С уменьшением температуры порошка до 25°С зарядка становится

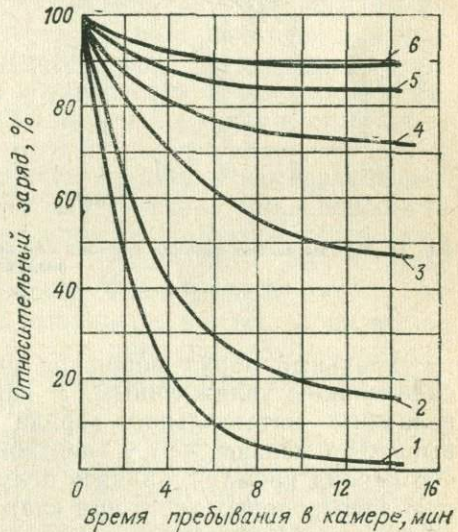


Рис. 25. Зависимость интегральных зарядов порошков электрокорунда и карбида кремния от времени пребывания в камере кипения при различных скоростях воздуха:

1 — ЭБ № М5, $v=20$ см/с; 2 — ЭБ № М20, $v=20$ см/с; 3 — ЭБ № М7, $v=8$ см/с; 4 — КЗ № М10, $v=8$ см/с; 5 — КЗ № М20, $v=8$ см/с; 6 — КЗ № М28, $v=8$ см/с

близким к симметричному. Повышение температуры микропорошков приводит к интенсивной их флюидизации, что увеличивает интегральный заряд. С увеличением скорости воздуха в камере кипения в результате повышения теплообмена в кипя-

шем слое наблюдается быстрое уменьшение интегрального заряда предварительно нагретого порошка. Уменьшение заряда порошков связано с увеличением их влажности. Увлажнение способствует образованию агломератов и ухудшает процесс кипения. Кроме того, с увеличением влажности более интенсивно разряжаются частицы. При использовании осушенного воздуха

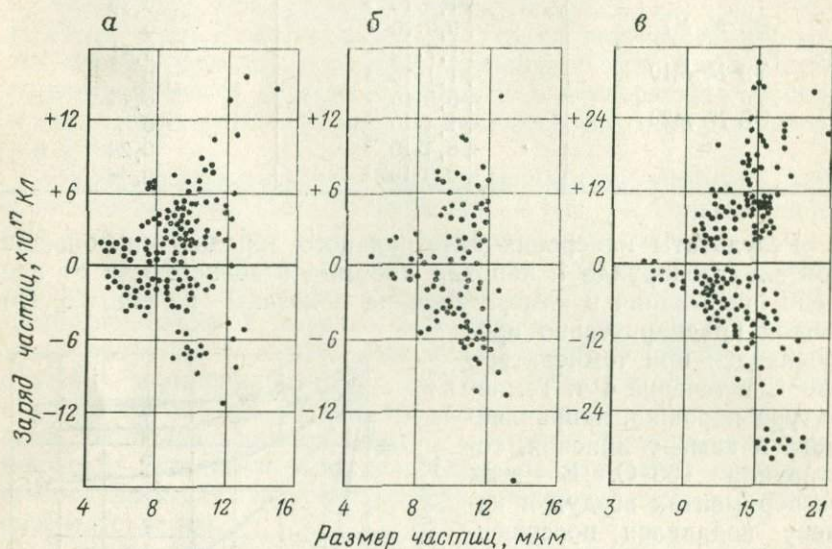


Рис. 26. Заряды частиц карбида кремния при различных температуре порошка и скорости воздуха:

а — 100° С, $v=8$ см/с; б — 25° С, $v=8$ см/с; в — 25° С, $v=20$ см/с

интегральный заряд порошков увеличивается в 2—3 раза по сравнению с увлажненным. У карбида кремния зависимость величины интегрального заряда от температуры и влажности выражена меньше, чем у электрокорунда. Это объясняется тем, что карбид кремния, являясь полупроводником, имеет достаточную электропроводность при влажности, близкой к нулю.

В следующей серии экспериментов исследовалась зависимость интегрального заряда от времени кипения порошков в установке. Интегральный заряд в процессе кипения постепенно увеличивался до определенной величины, а затем оставался постоянным на протяжении всего опыта. Время установления интегрального заряда порошков электрокорунда и карбида кремния 10—12 мин, а ПВБ 8—10 мин. При этом у поливинилбутираля в течение первых 3—4 мин положительный знак интегрального заряда изменяется на отрицательный, что связано, по-видимому, с наличием первоначального заряда, появившегося при транспортировке и хранении порошка. Установлено,

что увеличение интегрального заряда в процессе кипения порошка можно описать уравнением

$$Q = Q_{\text{ст}} (1 - e^{-\chi t}), \quad (16)$$

где Q — интегральный заряд в момент времени t , Кл/кг; $Q_{\text{ст}}$ — установившийся интегральный заряд порошка, Кл/кг; χ — параметр, зависящий от характера процесса кипения, материала порошка и камеры кипения.

Зависимость эта подтверждена более поздними исследованиями, проведенными в Италии [96] на сепараторе «Электродиклоджет». Стабилизация заряда частиц мелкодисперсных материалов через некоторый период времени после начала кипения свидетельствует, по-видимому, о наличии по крайней мере двух противоположно действующих факторов. С одной стороны, заряд увеличивается в зависимости от времени пребывания частиц в кипящем слое, в результате возрастания числа контактов, с другой — крупные частицы приобретают в процессе кипения меньший удельный заряд по сравнению с мелкими вследствие небольшой их подвижности и меньшей удельной поверхности при одном и том же числе контактов. Такие факторы, как увеличение числа контактов в процессе кипения, а также накопление заряда на стенках камеры и увеличение со временем влияния процессов разрядки, по-видимому, и приводят к стабилизации заряда.

Изучено также влияние скорости воздуха в камере кипения на величину интегрального заряда частиц микропорошков. Установлено, что с увеличением скорости воздуха интегральный заряд мелкодисперсных порошков (ЭБ № М5 — ЭБ № М14) остается примерно на одном уровне. Это подтверждается и результатами измерения зарядов отдельных частиц. Абсолютная величина зарядов отдельных частиц при увеличении скорости воздуха растёт, но число положительно и отрицательно заряженных частиц остается неизменным.

Интегральный заряд порошков, содержащий более крупные частицы (ЭБ № М20 — ЭБ № М28), увеличивается в 3—4 раза при увеличении скорости воздуха от 8 до 20 см/с. Аналогичные результаты получены при измерении зарядов отдельных частиц крупнодисперсных порошков.

При малых скоростях воздуха частицы порошка налипают в камере кипения на ее стенки, и зарядание происходит в основном в результате трения частиц друг о друга. В этом случае в аэрозольную фазу переходят симметрично заряженные частицы.

Частицы крупнодисперсных порошков меньше налипают на стенки камеры, поэтому зарядание носит несимметричный характер в результате трения частиц о стенки камеры. Соотношение между числом положительно и отрицательно заряженных

Распределение частиц порошков электрокорунда, карбида кремния и поливинилбутирала по полярности электрического заряда, %

Знак заряда	Марка порошка			
	ЭБ № М7	КЗ № М10	ЭБ № М20	ПВБ
Положительный (+)	50	53	61	25
Отрицательный (-)	43	37	31	73
Не регистрируется прибором	7	10	8	2

частиц, выносимых из кипящего слоя при скорости воздуха 20 см/с, приведено в табл. 4.

Анализировать данные интегральных измерений следует осторожно, так как отсутствие заряда у порошка при интегральных измерениях может быть, когда все частицы нейтральные, а также когда содержание (весовое) положительно и отрицательно заряженных частиц в порошке одинаково.

Среди частиц порошков электрокорунда, карбида кремния и ПВБ оказалось мало нейтральных частиц. Соотношение между положительно и отрицательно заряженными частицами следует учитывать при выборе знака потенциала, подаваемого на зарядные электроды при принудительном зарядании порошков.

На основании данных дифференциальных измерений была рассчитана поверхностная плотность зарядов частиц разных размеров. В среднем поверхностная плотность зарядов частиц микропорошков электрокорунда и карбида кремния составляет $(5-9)10^{-7}$ Кл/м². Близка к этой величине и поверхностная плотность зарядов частиц ПВБ. Поверхностная плотность зарядов частиц, выносимых воздушным потоком из кипящего слоя в отсутствие внешнего электрического поля, незначительно отличается от поверхностной плотности зарядов частиц при распылении микропорошков [64].

Избыточный заряд того или иного знака, регистрируемый при интегральных измерениях зарядов частиц, выносимых из кипящего слоя в отсутствие электрического поля, может возникнуть в результате того, что частицы порошков до помещения их в камеру кипения имели заряд преимущественно одной полярности, появившийся при транспортировке и хранении порошка, а также в результате того, что при трении о стенки и дно камеры кипения порошки заряжаются несимметрично.

Знак интегрального заряда порошков диэлектриков во многих случаях можно предвидеть, исходя из величин диэлектрических проницаемостей материала камеры и исследуемых порошков [34]. Микропорошки электрокорунда и карбида кремния, ϵ которых больше ϵ материала камеры кипения, при трении будут преимущественно отдавать электроны, заряжаясь поло-

жительно (в нашем случае камера изготовлена из оргстекла, $\epsilon = 3,5-4,5$). ПВБ, обладающий ϵ , меньшей ϵ камеры, будет вырывать из материала камеры электроны и заряжаться отрицательно, что и подтверждено экспериментами. Аналогичные результаты получены в работе [94] для большого числа полимерных дисперсных материалов.

Распределение зарядов частиц карбида кремния в зависимости от полярности при различных скоростях воздуха в камере кипения приведено в табл. 5.

Аналогичная зависимость получена для микропорошков электрокорунда и ПВБ.

Интегральный заряд порошков электрокорунда равен $+(1-4) \cdot 10^{-5}$ Кл/кг, карбида кремния $+(0,5-3,0) \cdot 10^{-5}$ Кл/кг, а ПВБ — $6,0 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг.

Повысить униполярность заряжения порошков и увеличить абсолютную величину зарядов частиц можно созданием в камере кипения сильных электрических полей. С этой целью исследо-

ваны контактный метод заряжения и заряжение в поле коронного разряда. При контактном методе применялись различные типы зарядных электродов: металлическая сетка, укрепленная выше пористого дна камеры; система параллельных прутков диаметром 4 мм, располагаемых как в верхней, так и в нижней зонах кипящего слоя; металлические пластины, установленные над металлической сеткой. Наилучшие результаты получены при использовании параллельных прутков, расположенных у поверхности кипящего слоя, и металлических пластин.

Для создания поля коронного разряда на расстоянии 50 мм от поверхности кипящего слоя устанавливались игольчатые электроды. Заземленный электрод в виде параллельных прутков диаметром 3 мм располагался выше коронирующего электрода на 100 мм. Зависимость интегрального заряда от потенциала коронирующего электрода при $v=8$ см/с показана на рис. 27, а распределение зарядов на отдельных частицах карбида кремния при заряжении в поле коронного разряда — на рис. 28. Интегральный заряд увеличивается с ростом потенциала коронирующего электрода, причем заряд стремится к насыщению.

Влияние скорости газа в камере кипения на величину интегрального заряда, приобретаемого частицами в поле коронного разряда, показано на рис. 29 и 30. С увеличением скорости

ТАБЛИЦА 5

Влияние скорости воздуха на полярность заряда частиц карбида кремния

Скорость воздуха, см/с	Заряд, %		
	положительный	отрицательный	меньший регистрируемого прибором
8	39	43	18
11	56	38	6
14	49	43	8
17	48	41	11
19	45	45	10
22	54	34	12
25	52	42	15
28	53	42	15

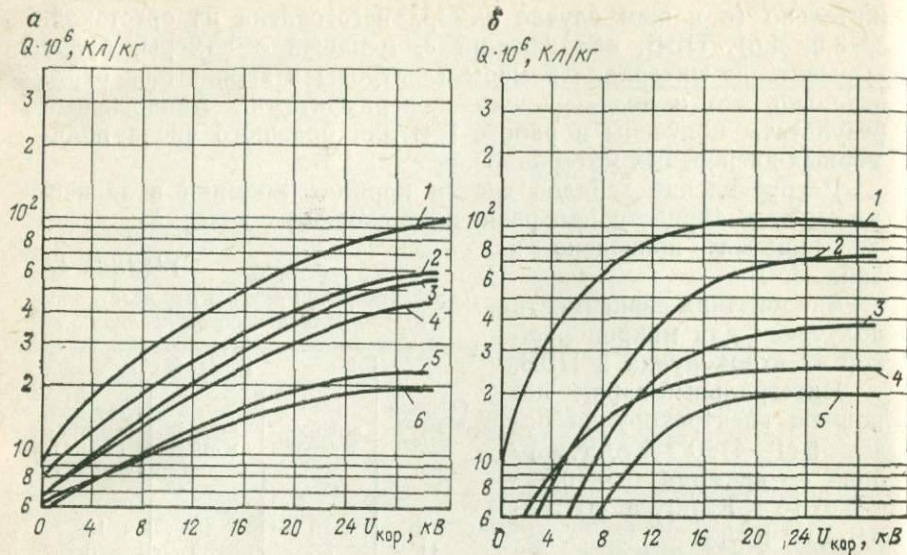


Рис. 27. Зависимость удельного интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от потенциала коронирующего электрода $V_{кор}$:

a — положительный потенциал; 1 — КЗ № М10; 2 — ЭБ № М10; 3 — КЗ № М20; 4 — ЭБ № М20; 5 — ЭБ № М7; 6 — КЗ № М28; b — отрицательный потенциал; 1 — КЗ № М10; 2 — ЭБ № М10; 3 — ЭБ № М7; 4 — КЗ № М20; 5 — КЗ № М28

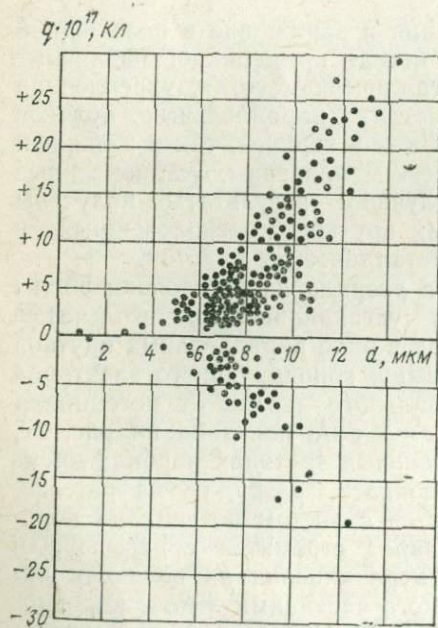


Рис. 28. Заряды q частиц карбида кремния размером d , приобретаемые в поле коронного разряда ($v=20$ см/с; $U_{кор}=-28$ кВ)

воздуха величина интегрального заряда резко снижается. По-видимому, это связано с уменьшением времени пребывания частиц в поле коронного разряда. В результате они не успевают приобрести достаточно большой заряд. Действительно, при скорости воздуха 5 см/с время зарядки частиц составляет около

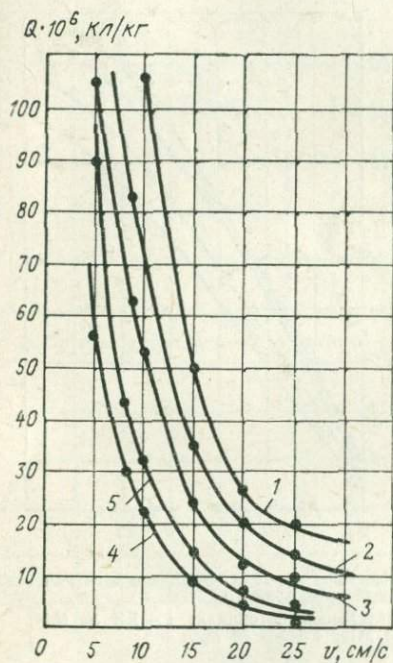


Рис. 29. Зависимость интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от скорости v воздуха в камере кипения при коронном разряде ($U_{кор} = +28$ кВ):

1 — КЗ № М10; 2 — КЗ № М20; 3 — КЗ № 28; 4 — ЭБ № М7; 5 — ЭБ № М20

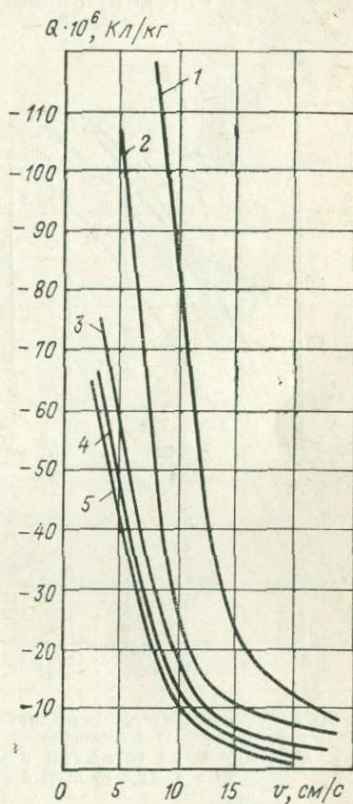


Рис. 30. Зависимость интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от скорости воздуха v в камере кипения при коронном разряде ($U_{кор} = -28$ кВ):

1 — КЗ № М10; 2 — КЗ № М20; 3 — КЗ № М28; 4 — ЭБ № М10; 5 — ЭБ № М20

1 с, а при скорости 20 см/с — 0,25 с. Учитывая большую концентрацию частиц в воздухе над кипящим слоем, можно предположить, что частицы приобретают максимальный заряд в этих условиях за время, превышающее 1 с.

Результаты исследования интегрального заряда частиц, приобретаемого при контактном методе зарядки в зависимости от величины потенциала, подаваемого на зарядные электроды,

показаны на рис. 31. Скорость воздуха в этих опытах составляла 8 см/с. Исследования подтвердили прямо пропорциональную зависимость величины заряда от потенциала зарядного электрода.

Заряды отдельных частиц карбида кремния, приобретаемые контактным методом, приведены на рис. 32 и 33. При увеличе-

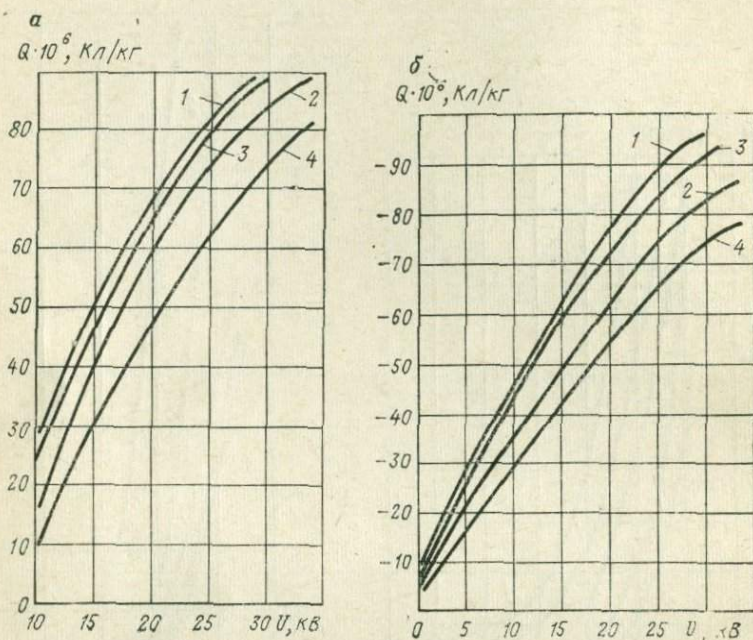


Рис. 31. Зависимость интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от потенциала зарядного электрода U :

a — положительный потенциал; b — отрицательный потенциал; 1 — КЗ № М10; 2 — КЗ № М28; 3 — ЭБ № М10; 4 — ЭБ № М20.

нии скорости воздуха заряды отдельных частиц возрастают, но соотношение между числом положительно и отрицательно заряженных частиц существенно не меняется.

Результаты измерений интегрального заряда микropорошков при контактном способе зарядания, в зависимости от скорости воздуха в камере кипения, показаны на рис. 34. Потенциал зарядных электродов $U_{зар}$ в этих опытах составлял ± 28 кВ. С увеличением скорости интегральный заряд частиц сначала возрастает, а затем резко уменьшается. Это объясняется тем, что при небольших скоростях воздуха с увеличением скорости увеличивается число контактов частиц с электродами в единицу времени. Дальнейшее повышение скорости сопровождается быстрым уносом частиц из слоя, в результате чего уменьшается число контактов. Кроме того, при больших скоростях заметное

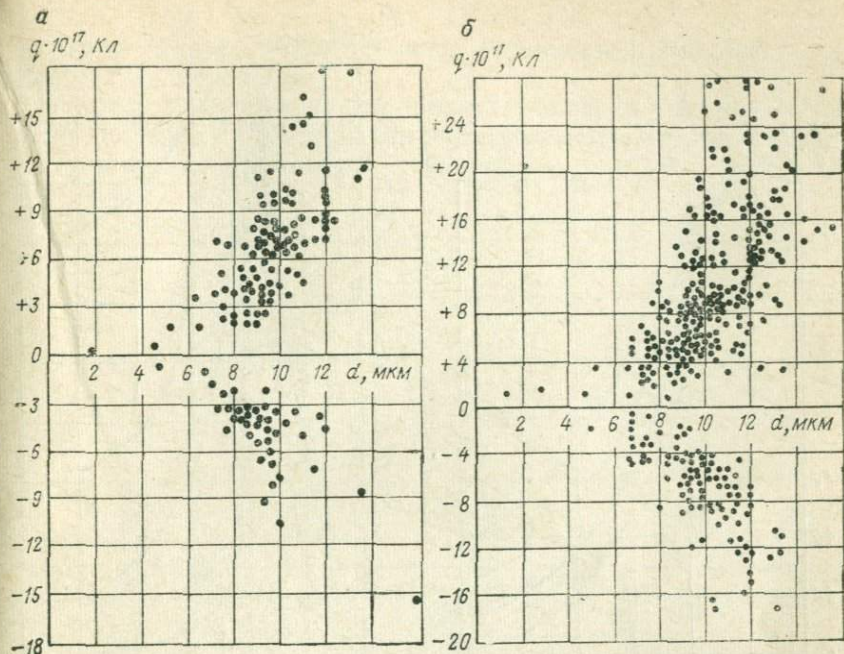


Рис. 32. Заряды q частиц карбида кремния размером d при контактном методе зарядания ($U = +28$ кВ):
 $a - v = 8$ см/с; $б - v = 20$ см/с

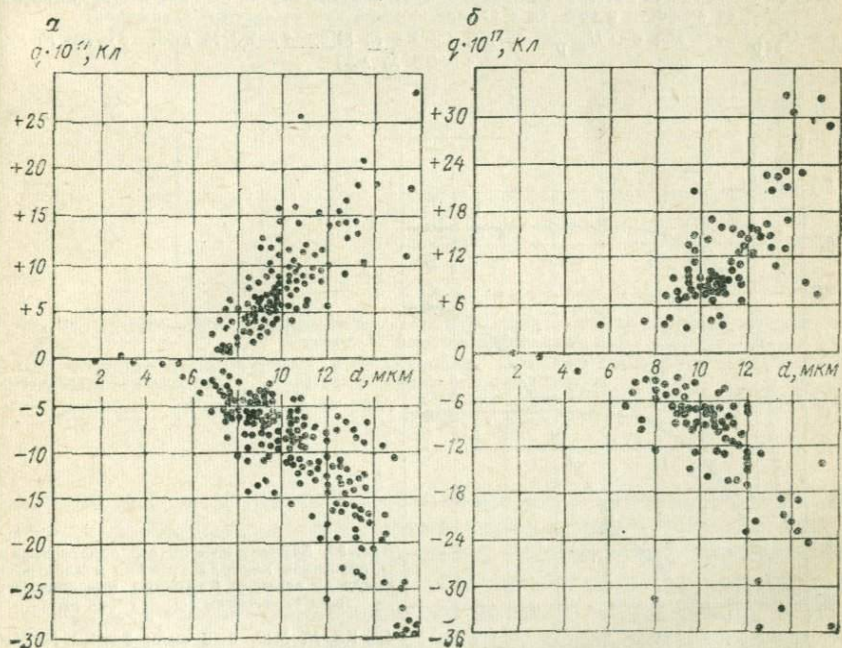


Рис. 33. Заряды q частиц карбида кремния размером d при контактном методе зарядания ($U = -28$ кВ):
 $a - v = 8$ см/с; $б - v = 20$ см/с

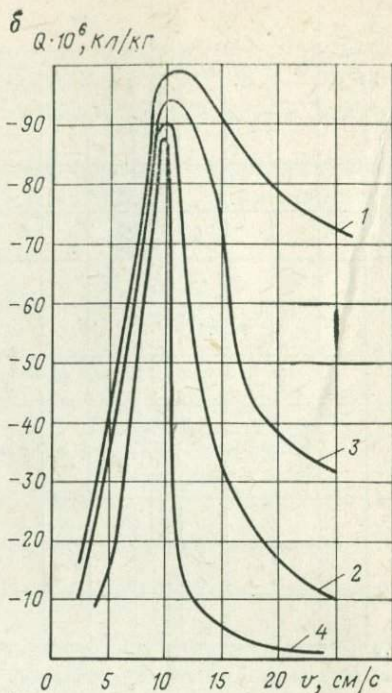
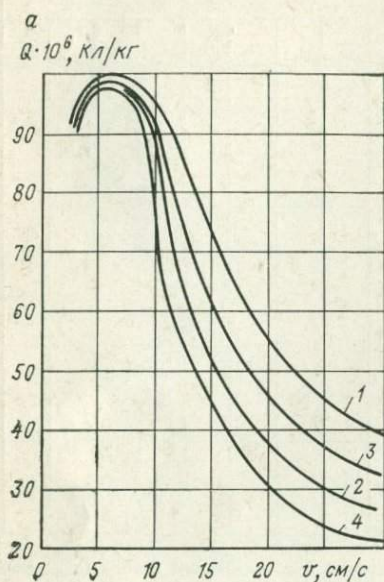


Рис. 34. Зависимость интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от скорости v воздуха в камере кипения при контактном зарядании:

$a - U_{\text{зар}} = +28 \text{ кВ}$; $б - U_{\text{зар}} = -28 \text{ кВ}$; 1 — КЗ № М10; 2 — КЗ № М28; 3 — ЭБ № М10; 4 — ЭБ № М20

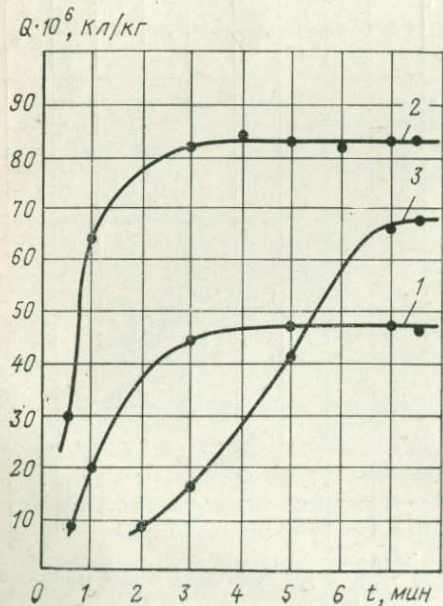


Рис. 35. Зависимость интегрального заряда Q порошков карбида кремния и электрокорунда от времени t кипения при контактном зарядании ($U_{\text{зар}} = +28 \text{ кВ}$):

1 — КЗ № М10, $v = 8 \text{ см/с}$; 2 — КЗ № М10, $v = 20 \text{ см/с}$; 3 — ЭБ № М20, $v = 20 \text{ см/с}$

влияние оказывает симметричное зарядание в результате трения частиц друг о друга.

Автором изучено также влияние сильного электрического поля на время стабилизации интегрального заряда порошков. Результаты экспериментов показаны на рис. 35. При подаче

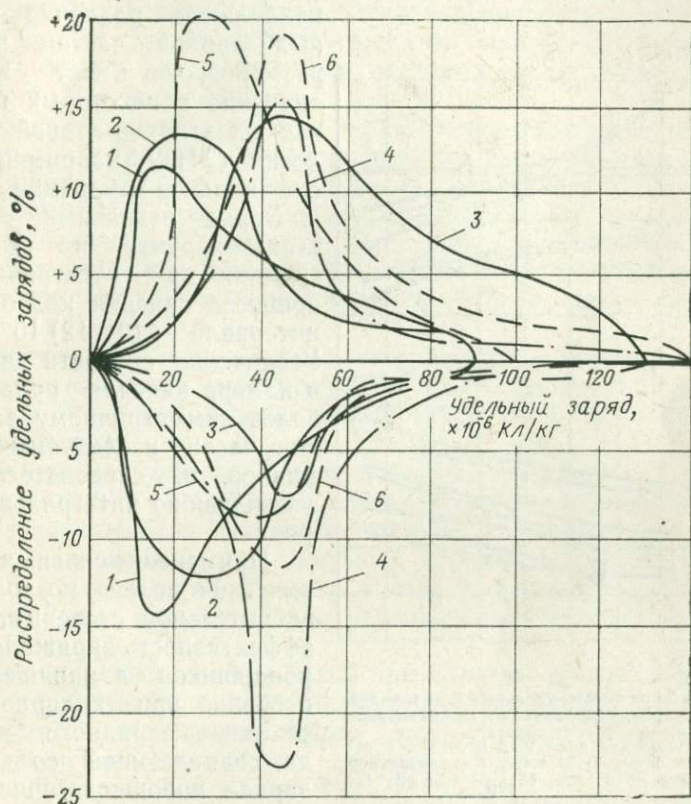


Рис. 36. Относительное распределение удельных зарядов частиц карбида кремния при различных методах зарядания:

1 — в отсутствие поля, $v=8$ см/с; 2 — в отсутствие поля, $v=20$ см/с; 3 — в поле коронного разряда, $v=20$ см/с, $U_{\text{кор}} = +28$ кВ; 4 — контактное зарядание, $v=8$ см/с; $U_{\text{зар}} = -28$ кВ; 5 — контактное зарядание, $v=8$ см/с, $U_{\text{зар}} = +28$ кВ; 6 — контактное зарядание, $v=20$ см/с, $U_{\text{зар}} = -28$ кВ

потенциала, знак которого совпадает со знаком интегрального заряда в отсутствие поля, время стабилизации уменьшается в 3—8 раз по сравнению со временем стабилизации заряда в отсутствие поля. При подаче на зарядные электроды потенциала, полярность которого противоположна полярности заряда частиц в отсутствие поля, интегральный заряд имеет меньшую величину, чем при подаче одноименного по знаку потенциала.

Для сравнения эффективности различных методов заряжения частиц в кипящем слое определялись зависимость величины удельного заряда частиц карбида кремния от их размера и относительное распределение удельных зарядов частиц (рис. 36 и 37). Наименьший разброс удельных зарядов наблюдается при контактном методе заряжения. В этом же случае наблюдается

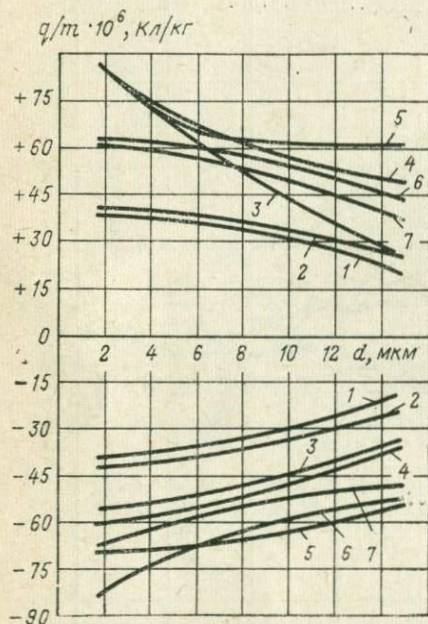


Рис. 37. Зависимость удельных q/m зарядов частиц карбида кремния от их размеров:

1 — в отсутствие поля $v=8$ см/с; 2 — в отсутствие поля, $v=20$ см/с; 3 — контактное заряжение, $v=8$ см/с, $U_{зар} = +28$ кВ; 4 — контактное заряжение, $v=20$ см/с, $U_{зар} = -28$ кВ; 5 — в поле коронного разряда, $v=20$ см/с, $U_{кор} = +28$ кВ; 6 — контактное заряжение, $v=8$ см/с, $U_{зар} = -28$ кВ; 7 — контактное заряжение, $v=20$ см/с, $U_{зар} = -28$ кВ

наибольшее различие удельных зарядов частиц разных размеров, что имеет важное значение в некоторых процессах электронно-ионной технологии (ЭИТ), например классификации и сепарации.

Заряд отдельных частиц электрокорунда и карбида кремния при электризации в процессе кипения колеблется в интервале $(0-12) 10^{-17}$ Кл. Увеличение скорости воздуха в камере кипения приводит к более симметричному заряжению частиц исследуемых материалов и, следовательно, к уменьшению интегрального заряда.

Применение сильных электрических полей позволяет в значительной степени повысить эффективность заряжения микророшков в кипящем слое, особенно при полярности потенциала зарядного электрода, совпадающей со знаком заряда порошков, приобретаемых в отсутствие поля. С увеличением электропроводности порошков (например, карбида кремния) величина заряда в меньшей степени зависит от полярности подаваемого на электроды потенциала.

Изучение заряжения частиц микророшков в кипящем слое в отсутствие внешнего поля позволило установить, что величина интегрального заряда в значительной мере определяется их влажностью и температурой. С повышением температуры интенсифицируется флюидизация порошка, что приводит к увеличению интегрального заряда. Увлажнение порошка способствует образованию агломератов и ухудшает процесс заряжа-

ния. Кроме того, с увеличением влажности увеличивается интенсивность процессов разрядки частиц.

По сравнению с электрокорундом у карбида кремния величина интегрального заряда в меньшей степени зависит от температуры, а следовательно, и от влажности. Это объясняется, по-видимому, тем, что карбид кремния, являясь полупроводником, имеет достаточно высокую электропроводность и в отсутствие влаги на его поверхности. Средняя величина дифференциального заряда при постоянных условиях эксперимента пропорциональна размеру частиц.

Увеличение скорости воздуха в камере кипения в отсутствие внешнего поля приводит к симметричному росту величины положительных и отрицательных зарядов отдельных частиц. При этом интегральный заряд тонкодисперсных порошков изменяется незначительно. Увеличение интегрального заряда крупнодисперсных порошков при увеличении скорости воздуха вызывается несимметричным заряданием порошков при трении о стенки и дно камеры.

В присутствии сильного электрического поля интегральный заряд микропорошков диэлектриков и полупроводников увеличивается в 5—10 раз, одновременно улучшается и униполярность зарядания.

Наилучшие результаты получаются при контактном заряде частиц в кипящем слое. В этом случае получают наибольшие удельные заряды. При зарядании в поле коронного разряда частицы, несущие большие удельные заряды, осаждаются на стенках камеры кипения. В связи с этим из кипящего слоя выносятся частицы с относительно небольшими удельными зарядами.

Нагрев порошков до 80—100° С при наличии в камере кипения сильного электрического поля также приводит к увеличению интегрального заряда. Кроме того, улучшаются условия флюидизации порошков.

3. Флюидизация тонкодисперсных материалов

Классификация частиц микропорошков в электрических полях успешно осуществляется только при подаче порошка в виде свободных зерен. Частицы микропорошков мельче 20 мкм обладают большой удельной поверхностью и образуют устойчивые агломераты, плотность которых значительно меньше плотности монолитного материала. Для разрушения таких агломератов требуются значительные затраты энергии.

Аутогезия (слипаемость частиц порошков) вызывается различными по своей природе силами [97]. Молекулярная (ван-дер-ваальсова) составляющая аутогезии обусловлена свойствами соприкасающихся частиц и зависит от их размеров и площади контакта. Силы двойного электрического слоя пропор-

циональны контактной разности потенциалов и площади соприкосновения. Присутствие влаги в зазоре между соседними частицами исключает возможность появления электрических сил.

При наличии на частицах электрического заряда кулоновские силы могут преобладать над остальными. Капиллярные силы аутогезии, возникающие при появлении мениска жидкости в зазоре между частицами, пропорциональны размерам частиц.

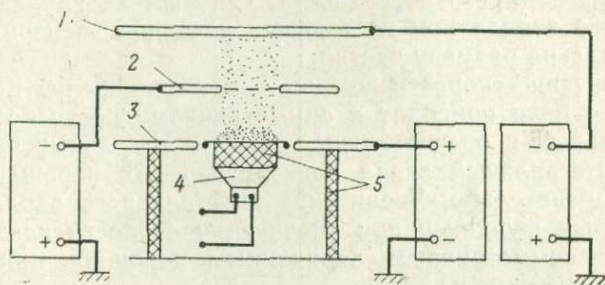


Рис. 38. Установка для флюидизации порошков звуковыми колебаниями:

1 и 2 — электроды; 3 — латунное кольцо; 4 — динамический громкоговоритель; 5 — изоляторы

Если относительная влажность воздуха превышает 65—70%, то аутогезия частиц в основном вызывается капиллярными силами.

Силы аутогезии в значительной мере определяются свойствами поверхности частиц, поэтому изменением характера поверхности (в частности, гидрофобилизацией) можно уменьшить аутогезию, а следовательно, улучшить флюидизацию (распыление порошка).

Флюидизация микропорошков воздействием на них колебаний звуковых частот исследовалась на установке, показанной на рис. 38. Установка представляет собой плоский конденсатор с горизонтально расположенными электродами. Верхний электрод диаметром 450 мм смонтирован на трех стойках из оргстекла, по которым он передвигается в вертикальном направлении. Нижний электрод диаметром 126 мм через изоляционное кольцо укрепляется на динамическом громкоговорителе—источнике звуковых колебаний.

Для исключения краевых эффектов нижний электрод окружен латунным кольцом, внутренний диаметр которого равен 130 мм, наружный 300 мм. На громкоговоритель подается сигнал от генератора ГЭ-4А. Эти колебания передаются нижнему электроду, на который помещается микропорошок исследуемого материала.

При подаче на пластины конденсатора высокого напряжения частицы микропорошка поднимаются вверх, когда напряженность электрического поля достигает определенной величины.

В электрическом поле перемещаются как отдельные частицы, так и агломераты. На верхнем электроде укреплены предметные стекла, на которые оседают поднявшиеся с нижнего электрода частицы. Степень распыления порошков определялась просмотром под микроскопом оседающих на предметные стекла частиц.

Подаваемый на динамический громкоговоритель сигнал изменялся по частоте (в пределах 50—8000 Гц) и по амплитуде (до 1 мм).

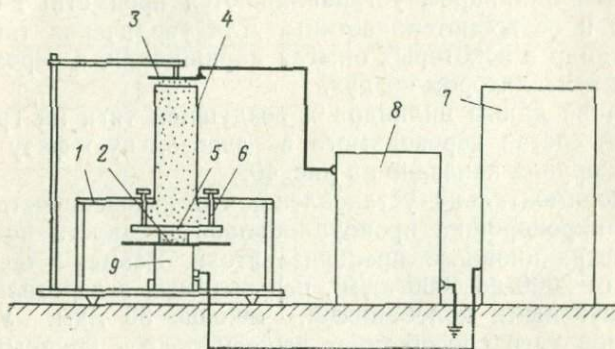


Рис. 39. Ультразвуковой флюидизатор:

1 — каркас; 2 — мембрана преобразователя; 3 — осадительный электрод; 4 — вытяжной цилиндр; 5 — прижимная пластина; 6 — регулировочный винт; 7 — ультразвуковой генератор; 8 — высоковольтный источник АФ-3; 9 — магнитострикционный преобразователь ПМС-6

Проведенные исследования показали, что при использовании колебаний звуковых частот хорошо распыляются металлические порошки, состоящие из сферических частиц, и алмазные микропорошки. Комкование микропорошков полимерных материалов и абразивов с частицами неправильной формы уменьшилось незначительно.

Известно, что ультразвук большой интенсивности, воздействуя на вещество, диспергирует его.

Для обработки микропорошков мощным ультразвуковым полем применялась установка (рис. 39), представляющая собой металлический каркас, в который встроен магнитострикционный преобразователь ПМС-6, возбуждаемый ультразвуковым генератором УЗГ-2,5А, работающим на частоте 19,5 кГц.

Исследуемый микропорошок помещается на рабочую площадку мембраны преобразователя, ограниченную кольцом. Диаметр кольца соответствует диаметру вытяжного цилиндра, установленного над мембраной и предназначенного для создания воздушной тяги. Кольцо прижимается к мембране пластиной с двумя регулировочными винтами, образуя ванну для флюидизации порошка. Воздух поступает в вытяжной цилиндр через щель между прижимной пластиной и нижним основанием ци-

линдра. Ширина щели регулируется изменением высоты ограничительного кольца.

Под действием колеблющейся мембраны агломераты порошков, проходя состояние, аналогичное кипению, распадаются на отдельные зерна, после чего отрываются от мембраны преобразователя в виде пылевого облака и увлекаются в вытяжной цилиндр. Для изучения степени разрушения агломератов и гранулометрического состава поднимаемого в воздух порошка над вытяжным цилиндром устанавливаются предметные стекла, на которые и осаждаются частицы. Для увеличения тяги вытяжной цилиндр в некоторых опытах наращивали, а через щель подавался вентилятором воздух.

Влияние длины цилиндра и воздушной тяги на гранулометрический состав переводимого в аэрозольную фазу порошка электрокорунда показано на рис. 40.

Экспериментально установлено, что интенсивность флюидизации микропорошка пропорциональна мощности возбуждения магнитострикционного преобразователя. Размер частиц плотностью от 2000 до 4000 кг/м³, переводимых в аэрозольную фазу ультразвуковыми колебаниями, меньше 30 мкм. Увеличение воздушной тяги способствует выносу более крупных частиц.

Флюидизацию порошка в ультразвуковом поле можно объяснить действием ряда факторов, главными из которых являются: большие ускорения, сообщаемые мембраной частицам микропорошка; прямое акустическое воздействие ультразвуковых колебаний на агломераты частиц, приводящее их в состояние, аналогичное псевдокипению; звуковой ветер, разгоняющий частицы микропорошка по воздуху (явление, наблюдаемое в ультразвуковых полях большой интенсивности).

Улучшению флюидизации микропорошка способствует их подсушка при обработке ультразвуком, так как в процессе работы мембрана преобразователя нагревается.

Исследовалось также влияние электростатического поля на гранулометрический состав аэрозольной фазы микропорошка, распыляемого ультразвуком. Для этого над вытяжным цилиндром размещался плоский электрод, к которому подводилось напряжение от высоковольтного источника.

Микропорошки при колебании пластины магнитострикционного преобразователя приобретают заряд в результате трения частиц о поверхность мембраны. Например, абразивный микропорошок на стальной пластине преобразователя получает отрицательный заряд.

Подавая на установленный над вытяжным цилиндром электрод потенциал, одноименный со знаком заряда частиц, можно выделить из исходного порошка частицы мельче 10 мкм. Некоторые результаты экспериментов показаны на рис. 41. По-видимому, в этом случае сила электростатического поля, действующая в направлении силы тяжести, отбрасывает вниз крупные

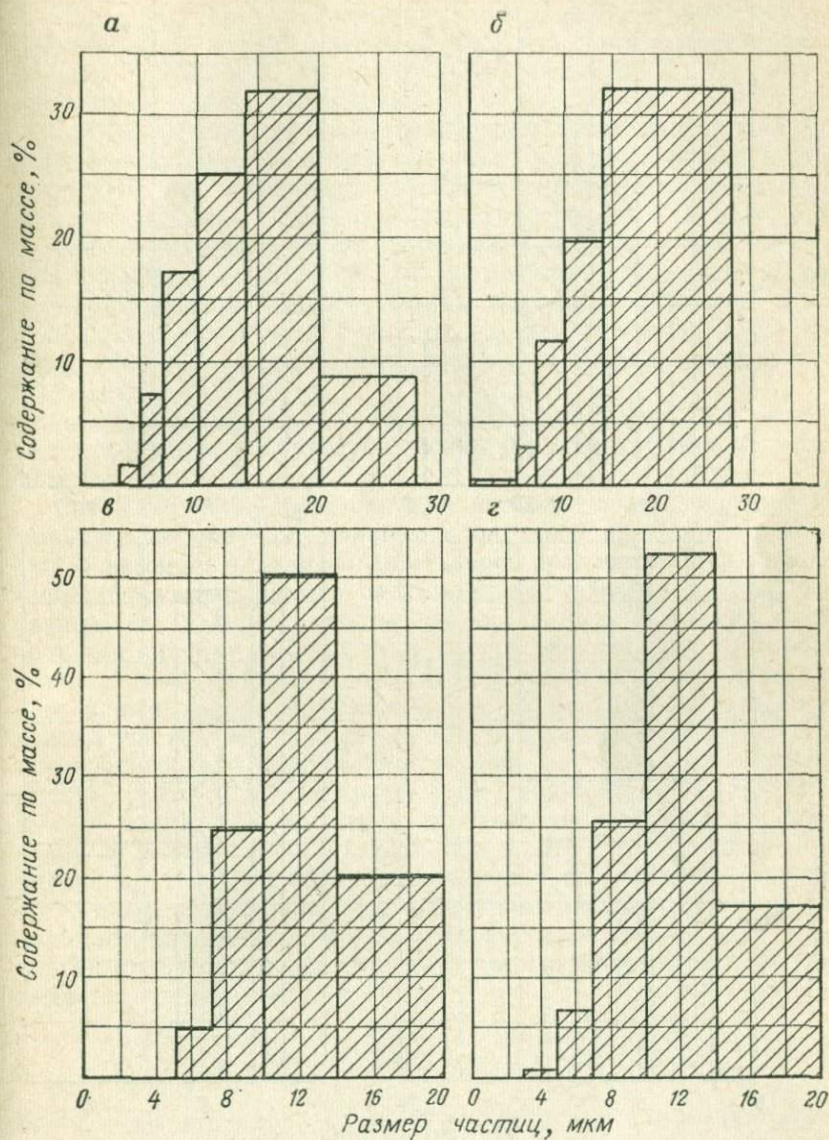


Рис. 40. Гранулометрический состав электрокорунда марки ЭБ № М14, переведенного в аэрозольную фазу ультразвуковыми колебаниями при различной высоте вытяжного цилиндра:

а — $h=1330$ мм, поддув не включен; б — $h=1330$ мм, поддув включен; в — $h=330$ мм, поддув не включен; г — $h=330$ мм, поддув не включен, воздушная тяга уменьшена

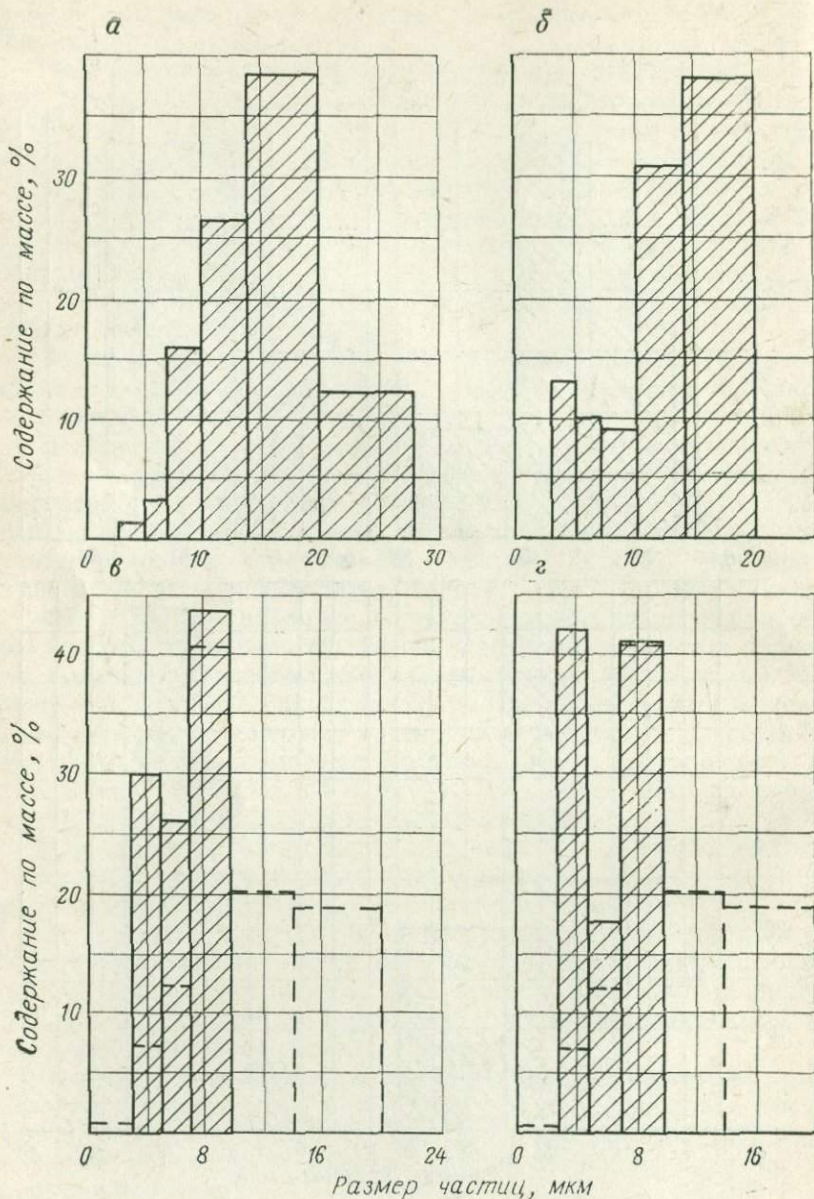


Рис. 41. Гранулометрический состав электрокорунда марки ЭБ № М14, переведенного в аэрозольную фазу ультразвуковыми колебаниями в электрическом поле при различном потенциале U на электроде:

a — $U = -5$ кВ, поддув включен; *б* — $U = -3$ кВ, поддув не включен; *в* — $U = -5$ кВ, поддув не включен; *г* — $U = -3$ кВ, потенциал на вытяжном цилиндре $+1$ кВ поддув не включен

частицы, для которых сила Стокса лишь ненамного превосходит силу тяжести.

Наложение на вытяжной цилиндр высокого напряжения противоположной заряду частиц полярности также дает положительные результаты, но при этом много частиц осаждаются на внутреннюю стенку цилиндра.

Таким образом, электростатическое поле в сочетании с ультразвуковыми колебаниями позволяет классифицировать флюидизированные ультразвуком микропорошки, однако производительность этого процесса незначительна. Ультразвуковые колебания для разрушения агломератов частиц микропорошков целесообразно использовать при размерах частиц мельче 20 мкм.

Увеличение производительности поддуванием воздуха в зону распыления ухудшает результаты флюидизации, так как в этом случае наряду с отдельными частицами в аэрозольную фазу переходят и агломераты.

Комбинированным воздействием на микропорошки электрического поля и ультразвука можно получить фракции мельче 30 мкм.

Распылять микропорошки можно также путем перевода их в аэрозольную фазу из кипящего слоя. Последний обычно создается в камере с пористым дном, через которое продувается газ. Существование кипящего слоя монодисперсных порошков ограничивается, с одной стороны, скоростью газа в момент начала процесса кипения, а с другой — скоростью газа, при которой начинается унос частиц из слоя [91]. Процесс кипения для полидисперсных порошков усложняется. В результате воздействия мелких частиц на крупные скорость полного ожигения полидисперсного слоя оказывается меньше расчетной для наиболее крупных частиц слоя. В то же время кипящий слой удерживает мелкие частицы, препятствуя их мгновенному уносу при достаточно больших скоростях газа. При скорости газа над слоем, равной критической (равнодействующая всех сил, действующих на частицу, равна нулю), слой начинает расширяться. При этом начинает влиять дисперсность порошка. У порошков, размер частиц которых больше 0,15—0,2 мм, сопротивление слоя определяется уравнением

$$\Delta p = L \operatorname{grad} p = \frac{\kappa L v_{\text{кр}} \eta K_{\text{п}}^2}{r^2 (1 - K_{\text{п}})^3}, \quad (17)$$

где L — высота слоя, м; $\operatorname{grad} p$ — градиент давления среды в кипящем слое, Па/м; κ — коэффициент формы

$$\kappa = \frac{S_{\text{ч}}}{S_{\text{ш}}},$$

$S_{\text{ч}}$ — поверхность частицы, м²; $S_{\text{ш}}$ — поверхность частицы, равновеликой шару, м²; $v_{\text{кр}}$ — критическая скорость кипения среды над слоем, м/с; η — вязкость среды, Па·с; $K_{\text{п}}$ — коэффициент

заполнения пространства (объем дисперсной фазы в 1 м³ слоя).

Порошок в этом случае расширяется равномерно; соприкосновение между частицами сохраняется; структура порошка становится более рыхлой.

Для тонкодисперсных порошков, в которых заметную роль играет аутогезия, наблюдается отклонение от уравнения (17). Отношение скорости газа к сопротивлению слоя растет пропорционально выражению $\left[\frac{(1 - K_n)^3}{K_n^2} \right]^n$, где $n > 1$. Показатель степени n возрастает по мере уменьшения размера частиц. Это указывает на то, что в случае тонкодисперсных порошков слой расширяется равномерно. Наблюдения за кипением микropорошков полимерных материалов и люминофора показали, что при малых скоростях газа в камере слой распадается на отдельные агломераты, и под действием динамического давления струй газа происходит прорыв части его (в виде каналов и пузырей). Через эти проходы прорывается значительная часть газа, поэтому скорость течения его больше вычисленной теоретически.

Слой порошка при прохождении через него газа расширяется в зависимости от свойств и дисперсности порошка от 5 до 20% начального объема.

Структуру кипящего слоя можно разделить на три зоны: первая зона — кипящая фаза; вторая зона — переходная фаза; третья зона — взвешанная фаза.

Для первой зоны справедливо соотношение [98]

$$\xi - \xi_{\min} = K_k (v - v_{кр}), \quad (18)$$

где ξ — доля пустот в рабочей зоне слоя; ξ_{\min} — доля пустот в начале кипения; K_k — коэффициент пропорциональности, с/м; v — скорость газа в кипящем слое, отнесенная ко всему сечению; $v_{кр}$ — критическая скорость кипения.

При дальнейшем увеличении скорости газа через кипящий слой все в большем количестве прорываются газовые пузыри. В слое начинается энергичное перемешивание и непрерывное образование и разрушение агломератов, сопровождающееся уносом частиц в аэрозольную фазу. Агрегирование частиц в кипящем слое обусловлено действием гидродинамических сил, а также молекулярных, электростатических и других сил притяжения между частицами [97]. Перемешивание частиц, вызванное главным образом неоднородностью слоя, вызывает разрушение агломератов и восстановление однородности кипения.

С уменьшением крупности порошков возрастает влияние аутогезионных сил и ухудшается флюидизация. Наиболее равномерная флюидизация наблюдается у порошков с частицами размером больше 20—30 мкм. Хорошее распыление их объяс-

няется благоприятным соотношением гидродинамических сил, возрастающих с увеличением размера частиц, и молекулярных сил, убывающих с увеличением крупности порошков.

Флюидизация микропорошков улучшается с уменьшением их влажности и значительно снижается при относительной влажности газа (воздуха) выше 70%. Поэтому для улучшения распыления микропорошки необходимо предварительно просушивать.

Скорость воздуха в камере кипения выбирается исходя из размера частиц основной фракции классифицируемого микропорошка. Из теории кипящего слоя известно, что скорость воздуха в камере кипения непостоянна по сечению. Она уменьшается по мере приближения к стенкам камеры. Поэтому воздушным потоком выносятся частицы, скорость свободного падения которых в стационарных условиях близка к скорости восходящего потока в центральной части камеры кипения.

На установке, показанной на рис. 42, изучалась зависимость размера частиц, выносимых из кипящего слоя, от скорости воздуха в камере кипения. Эксперименты проводились с микропорошками электрокорунда ЭБ № М20 и ЭБ № М40. Гранулометрический состав их приведен в табл. 6.

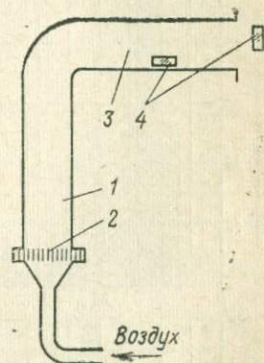


Рис. 42. Установка с кипящим слоем:

1 — камера кипения; 2 — пористая перегородка; 3 — горизонтальный патрубок; 4 — предметные стекла

ТАБЛИЦА 6

Гранулометрический состав исходных микропорошков, % по массе

Марка порошка	Фракция, мкм								
	60—40	40—28	28—20	20—14	14—10	10—7	7—5	5—3	<3
ЭБ № М20	—	16,3	17,2	34,5	17,6	11,7	1,4	1,0	0,3
ЭБ № М40	4,0	42,5	40,5	11,0	1,4	0,5	0,1	0,1*	—

* Фракция — 5 мкм.

Выносимые из кипящего слоя частицы порошка собирались на предметные стекла, помещаемые в горизонтальном патрубке установки и в потоке воздуха на выходе из горизонтального патрубка. Гранулометрический состав фракций порошков, оседающих на предметные стекла в горизонтальном патрубке установки (рис. 43), определялся микроскопическим методом.

С увеличением скорости воздуха увеличиваются размеры частиц, переходящих в аэрозольную фазу. Так как скорость воздуха в поперечном сечении камеры кипения уменьшается по

направлению к стенкам, а частицы большинства классифицируемых материалов имеют форму, отличную от сферической, то при определенной скорости воздуха из слоя уносятся частицы не узкой фракции, а разнообразных размеров.

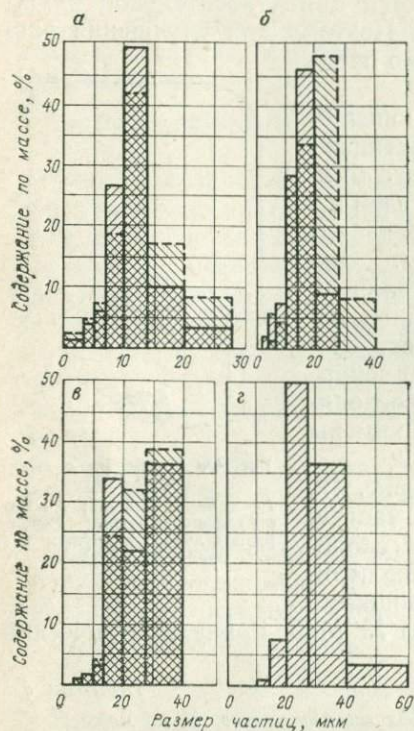


Рис. 43. Гранулометрический состав фракций электрокорунда марки ЭБ № М10, выносимых из кипящего слоя при различных скоростях воздуха:

а — 2 см/с (сплошные линии) и 2,5 см/с (пунктирные линии); б — 5 см/с (сплошные линии) и 6 см/с (пунктирные линии); в — 10 см/с (сплошные линии) и 12 см/с (пунктирные линии); г — 14 см/с

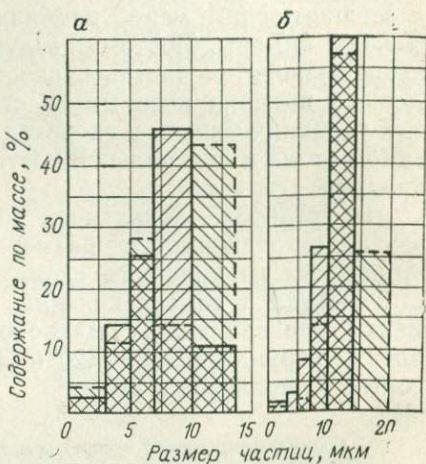


Рис. 44. Гранулометрический состав фракций электрокорунда марки ЭБ № М20, выносимых из кипящего слоя при различных скоростях воздуха:

а — 2,5 см/с (сплошные линии) и 2,8 см/с (пунктирные линии); б — 6 см/с (сплошные линии) и 9,6 см/с (пунктирные линии)

Сравнение полученных расчетным путем граничных размеров частиц, выносимых из кипящего слоя, с экспериментальными показывает, что при расчете размеры получаются заниженными.

Расчетные граничные размеры частиц

Размер частиц, мкм . . .	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
Скорость воздуха, см/с	0,17	0,69	1,52	2,74	4,30	6,15	8,40	13,3	17,1	24,60

Это расхождение можно объяснить наличием в центральной части камеры зоны над слоем, в которой скорость воздуха значительно превышает среднюю скорость по всему объему камеры.

На рис. 44 приведен гранулометрический состав проб, отобранных из потока воздуха на выходе из горизонтального патрубка установки. В этом случае расчетные данные оказываются завышенными, что является следствием воздушной классификации частиц в горизонтальном патрубке установки, при которой самые крупные частицы оседают на стенке патрубка.

В процессе кипения в верхней части слоя увеличивается содержание мелкой фракции, переходящей в основном во взвешенное состояние. В результате оставшийся в камере кипения микропорошок обогащается крупными фракциями (рис. 45).

С помощью кипящего слоя можно распылять микропорошки различной дисперсности с необходимой производительностью. При этом флюидизацию микропорошков можно совместить с предварительной классификацией исходного материала, обогащая переводимый в аэрозольную фазу порошок определенной фракцией. Достигается это выбором соответствующей скорости воздуха в камере кипения.

Флюидизация тонкодисперсных порошков различных материалов улучшается при уменьшении их влажности и снижении относительной влажности воздуха, используемого для создания кипящего слоя.

Наблюдающуюся в камере кипения неоднородность слоя, а также связанное с ней образование каналов при небольших скоростях воздуха можно устранить периодическим встряхиванием камеры [99], перемешиванием порошка лопастями, устанавливаемыми в камере над пористой перегородкой [54], а также тангенциальным вводом газа через боковые стенки камеры или через ее днище [100].

Применение кипящего слоя для флюидизации облегчает зарядание микропорошков перед их классификацией в электрическом поле.

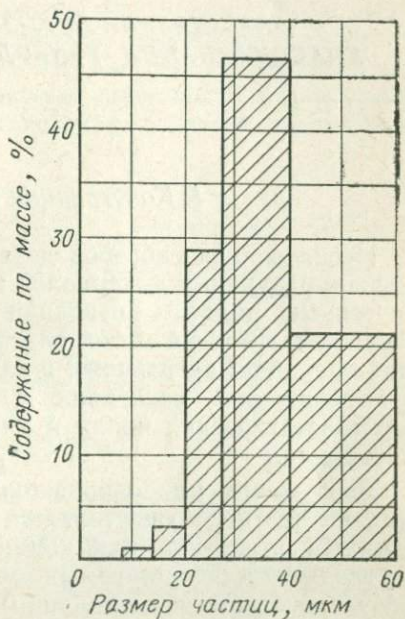


Рис. 45. Гранулометрический состав микропорошка в камере кипения после 2 ч работы установки при скорости воздуха 6 см/с

Глава III

ФЛЮИДИЗАЦИОННО-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Конструкция классификаторов

Исследования способов дезагрегации и заряжания микропорошков различных материалов и взаимодействия частиц с электрическими полями позволили разработать флюидизационно-электростатический метод классификации, включающий следующие операции: распыление и зарядание частиц микропорошков, классификацию последних в фокусирующем и ускоряющем электростатических полях и улавливание классифицированного материала.

Распыление микропорошков в зависимости от крупности и когезии частиц осуществляется посредством механической вибрации, ультразвука или кипящего слоя. В последнем случае перевод классифицируемых микропорошков в аэродисперсную фазу производится восходящим воздушным потоком. Скорость воздуха, регулируемая в зависимости от крупности зерна порошка, уменьшается при увеличении дисперсности порошка.

Заряжаются частицы одновременно с дезагрегацией порошка, для чего в распылительной камере размещены зарядные электроды. Использование для флюидизации восходящего потока воздуха позволяет проводить предварительную классификацию микропорошков в камере кипения, тем самым предотвращая поступление самых крупных частиц в электростатическое поле.

Заряженные частицы порошков поступают в ускоряющее и фокусирующее электростатические поля (создаваемые сетчатыми электродами), в которых выделяются отдельные фракции. Максимальные размеры частиц этих фракций определяются размерами ячеек сетчатых электродов.

Из всех рассмотренных вариантов осаждения частиц самой мелкой фракции, не задерживаемых последним сетчатым электродом, оптимальным оказался метод осаждения в электрическом поле коронного разряда. Достоинствами его являются небольшое сопротивление воздушному потоку, простота и высокий к. п. д.

Первоначально был сконструирован лабораторный электроклассификатор (рис. 46) для проведения экспериментальных работ по исследованию возможности классификации микропорош-

ков на узкие фракции. Установка выполнена в виде вертикальной трубы диаметром 80 мм, в которой создается кипящий слой, и горизонтальной трубы — классификатора. Камера кипения состоит из конуса, через который подается сжатый воздух, и цилиндра высотой 100 мм, между которыми располагаются пористая перегородка и зарядный электрод в виде металлической сетки с ячейками размером 0,8—1 мм. Поверх сетки укреплены крестообразно вертикальные пластины высотой 10 мм. Камера кипения цилиндрическим патрубком герметически соединена с блоком основного классификатора, собранного из нескольких одинаковых секций — дисков, между которыми расположены сетчатые электроды. Размеры ячеек сетчатых электродов выбираются в зависимости от размера частиц классифицируемых порошков. Размеры ячеек первого сетчатого электрода самые крупные. Секции имеют ссыпные щели, закрытые приемниками. За сетчатыми электродами установлен цилиндрический электрофильтр, улавливающий самую мелкую фракцию. Для равномерности потока воздуха в классификаторе на выходе установки смонтирован отсасывающий вентилятор, производительность которого можно регулировать. Для наблюдения за процессом классификации основные узлы установки изготовлены из оргстекла.

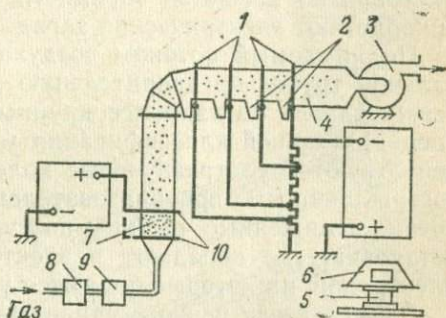


Рис. 46. Лабораторный флюидизационно-электростатический классификатор:

- 1 — сетчатые электроды; 2 — приемники;
- 3 — вентилятор; 4 — электрофильтр; 5 — магнитострикционный преобразователь;
- 6 — кожух; 7 — камера кипения; 8 — фильтр;
- 9 — осушитель; 10 — зарядные электроды

Поддаваемый в классификатор воздух предварительно пропускается через фильтр ФЭВ-6М и силикагелевый осушитель.

При классификации микропорошков крупностью меньше 20 мкм камера кипения снимается, а на ее место крепится кожух магнитострикционного преобразователя. В кожухе имеются раздвижные щели для регулирования притока воздуха. Длина вертикальной и горизонтальной частей установки может изменяться увеличением или уменьшением числа секций.

На зарядный электрод подается потенциал 3—10 кВ. Сетчатым электродам сообщаются потенциалы от делителя высокого напряжения, собранного из высокоомных сопротивлений. Знак напряжения, подаваемого на сетчатые электроды, выбирается противоположным знаком заряда частиц классифицируемого материала. Потенциалы на электродах подбираются таким образом, чтобы напряженность электростатического поля перед электродом была меньше напряженности поля за ним.

В зависимости от размеров классифицируемых частиц устанавливается соответствующая скорость воздушного потока, а величина ускоряющих потенциалов изменяется от 5 до 30 кВ.

Исследуемый микropошok загружается в камеру кипения, в которую подается через пористую перегородку осушенный и очищенный от пыли воздух. Расход воздуха, а следовательно, и его скорость в полости классификатора поддерживается на определенном уровне и контролируется ротаметром РС-3. Частицы классифицируемого материала, перемещаясь в кипящем слое, многократно касаются зарядного электрода, в результате чего приобретают электрический заряд.

Поднимаемый потоком воздуха порошок проходит в вертикальной трубе предварительную воздушную классификацию, освобождаясь от наиболее крупных частиц. Для распыления и предварительной классификации микropошokов мельче 20 мкм используются ультразвуковые колебания, возбуждаемые магнитострикционным преобразователем. Взвешенные в воздушном потоке заряженные частицы поступают в горизонтальную часть установки, где попадают в электростатическое поле сетчатых электродов, на которые подаются ускоряющие потенциалы.

Размер ячеек первого управляющего электрода должен быть на несколько микрон меньше максимального размера частиц самой крупной фракции, которую необходимо получить.

Частицы микropошokа, проникшие за первую сетку, ведут себя по-разному. Крупные частицы осаждаются в первой секции, а более мелкие под действием ускоряющего электростатического поля и воздушного потока достигают сетчатого электрода следующей секции, размер ячеек которого немного меньше наименьшего допустимого размера частиц самой крупной отбираемой фракции.

В каждой последующей секции размер ячеек сетчатых электродов постепенно уменьшается.

Задержанные в каждой секции частицы классифицируемого материала собираются в приемники, из которых они поступают в случае необходимости на пересортировку для дополнительного отделения мелких частиц и получения более узких фракций крупности.

В процессе работы подбирались оптимальные режимы классификации для каждого материала и определялся гранулометрический состав получаемых фракций.

Для удаления частиц, задерживаемых сетчатыми электродами, впоследствии устанавливался пневматический вибратор. Было установлено, что для разрушения каналов в слое при небольших скоростях воздуха необходимо периодически встряхивать также камеры кипения. Небольшие количества микropошokов, имеющих незначительную когезию, можно разделять в фокусирующем электростатическом поле при флюидизации их механической вибрацией на классификаторе, показанном на

рис. 47. Основными узлами классификатора являются наклонная классификационная камера, вибратор и два высоковольтных источника. В классификационной камере укреплены два параллельных электрода: мелкоструктурный сетчатый и приемный сплошной. Сетчатый электрод имеет длину 32 см и ширину 4 см. Камера может устанавливаться под необходимым углом к горизонту.

В крышке классификационной камеры вблизи верхнего торца размещен загрузочный бункер, а в нижнем торце камеры имеются щели для выпуска продуктов классификации в приемники.

Классификационная камера присоединена к вибратору, частота колебаний которого регулируется. На сетчатый и сплошной электроды подают потенциалы от разнополярных источников для создания фокусирующего электростатического поля.

Предварительно просушенный порошок засыпается в бункер классификационной камеры, из которого он равномерным потоком подается на сетчатый электрод. Между сетчатым и приемным электродами создается фокусирующее электростатическое поле. Под действием этого поля и механической вибрации частицы классифицируемого порошка, имеющие размеры меньше размеров ячейки сетчатого электрода, проникают сквозь сетку и, скользя по приемному электроду, собираются в приемном бункере. Не прошедшие сквозь сетчатый электрод частицы накапливаются в бункере для крупной фракции.

На данном классификаторе можно получать фракции микророшков максимальной крупности от нескольких десятков микрон до 10 мкм. Производительность классификатора по исходному продукту составляет около 1 кг за смену.

При классификации частиц проводящих и полупроводящих материалов в ряде случаев наблюдается перезарядка частиц на приемном электроде, в результате чего частицы отрываются под действием кулоновской силы и вибрации от приемного электрода и осаждаются на сетчатом классифицирующем электроде, нарушая режим работы классификатора. Для предотвращения

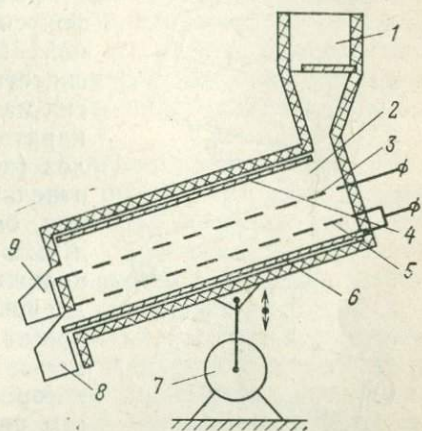


Рис. 47. Лабораторный электромеханический классификатор с фокусирующим полем:

- 1 — загрузочный бункер; 2 — классификационная камера; 3 — классифицирующий сетчатый электрод; 4 — плоский электрод; 5 — приемный сетчатый электрод; 6 — приемный сплошной электрод; 7 — вибратор; 8 — приемник для подрешетного продукта; 9 — приемник для надрешетного продукта

забивания снизу классифицирующего электрода просеянными частицами устанавливают дополнительный электрод с крупными ячейками, располагая его между классифицирующим и приемными электродами [49]. При подаче одинакового по величине и знаку потенциала на дополнительный сетчатый и сплошной приемные электроды электрическое поле в пространстве между ними отсутствует, поэтому попадающие на сплошной приемный электрод частицы двигаются вдоль него только под действием вибрации.

Электростатический сепаратор с фокусирующими полями для непрерывной классификации микропорошков синтетических алмазов, эльбора и других материалов показан на рис. 48. Сепаратор состоит из трех основных узлов (конструктивно оформлены в виде отдельных блоков): пульта управления, блока классификационных кассет и высоковольтных источников питания положительной и отрицательной полярности. Блок классификационных кассет изготовлен в виде опорной рамы со стойкой, на передней стороне которой смонтированы друг над другом пять вибраторов с классификационными кассетами. Вибратор состоит из плиты, на которой с помощью пружинных опорных наклонных пластин шарнирно установлена платформа с кассетой. Платформа упругой пластиной соединена с эксцентриковым механизмом, снабженным электродвигателем постоянного тока и тахогенератором ТГП-3, предназначенным для измерения частоты колебаний кассеты.

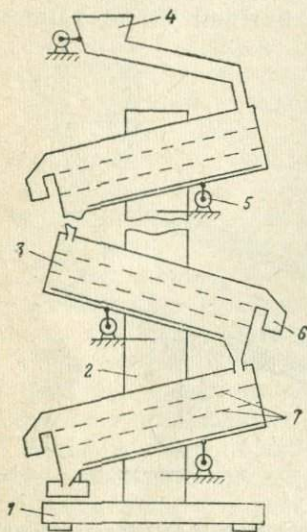


Рис. 48. Электромеханический сепаратор с фокусирующими полями:

- 1 — опорная рама; 2 — стойка;
3 — классификационная камера;
4 — загрузочный бункер; 5 — вибратор;
6 — приемник; 7 — электроды

Изменением угла наклона опорных пластин плоскость колебаний кассеты может располагаться под углом от 0 до 15° относительно горизонтали. Вибраторы с кассетами устанавливаются под углом от -6 до +6° к горизонту поворотом плиты относительно стойки.

На верхнем вибраторе укреплен загрузочный бункер, снабженный электромагнитным вибратором-соленоидом, который предназначен для подачи классифицируемого материала в бункер верхней кассеты. Подача порошка осуществляется путем встряхивания бункера штоком вибратора.

Бункеры кассет также оснащены автономными электромагнитными вибраторами. Эти бункеры служат для точной дозировки классифицируемого порошка в рабочую зону кассеты

Выходное отверстие бункера закрыто дозирующей сеткой с ячейками размером 120 мкм.

Классификационная кассета представляет собой герметичный короб, в центральной зоне которого размещен классифицирующий сетчатый электрод, а в нижней зоне установлены два приемных плоских электрода. Классифицирующий электрод выполнен в виде жесткой металлической пластины размером 440×95 мм с двенадцатью окнами площадью 36×30 мм². На окна наклеены мелкоструктурные сетки с ячейками требуемого размера. На расстоянии 20 мм ниже классифицируемого электрода расположен сетчатый приемный электрод с ячейками размером 4—5 мм. На дне кассеты на расстоянии 10 мм от сетчатого закреплен полированный сплошной приемный электрод. Высокое напряжение на электроды подается с помощью шин, размещенных на задней стороне стойки.

Классифицируемый порошок из бункера кассеты через соединительный патрубок и загрузочные окна в крышке кассеты поступает на классифицирующий электрод и разделяется на нем на два продукта: надрешетный и подрешетный. Надрешетный продукт через разгрузочные окна кассеты собирается в приемник для кружной фракции. Захваченные фокусирующим полем и проникшие через классифицирующий электрод частицы пролетают через ячейки крупноячейстого приемного электрода и осаждаются на поверхности сплошного приемного электрода. Под действием вибрации надрешетный продукт продвигается вдоль сплошного приемного электрода и через выходные окна в торце кассеты поступает в бункер следующей кассеты, где все операции повторяются. Таким образом, из исходного материала выделяется шесть фракций.

Бункеры классификационных кассет обеспечивают дозировку порошка от 0,05 до 0,15 г/с. Период встряхивания бункеров 0,8—1,5 с. Частота колебаний классификационных кассет плавно регулируется от 0,5 до 80 Гц, амплитуда колебаний кассет составляет 0,15 мм.

Питание классификатора осуществляется трехфазным переменным током напряжением 380 В от четырехпроводной линии с нулевым проводом. Потребляемая классификатором мощность не превышает 1,5 кВт. В классификаторе использованы высоковольтные источники ГК-80/0,15 с максимальным напряжением 80 кВ.

Образец флюидизационно-электростатического классификатора значительно большей производительности, чем описанные выше, показан на рис. 49. Классификатор выполнен в виде единого агрегата. В нем размещены: камера кипения, блок сетчатых электродов, электрофильтр, высоковольтные источники и пульт управления. Основанием классификатора служит сварной каркас, внутренняя полость которого разделена плитой из текстолита на две части. В верхней части установлены воздухопровод, блок

сетчатых электродов с электровибратором для встряхивания секций и электрофильтр, присоединяемый к вытяжной системе вентиляции.

В нижней части установки размещены: камера кипения, два источника высокого напряжения разноименной полярности и пневматический вибратор камеры кипения. Первоначально вибратор предназначался также и для встряхивания блока сетчатых электродов, но вследствие недостаточной эффективности он был заменен отдельным электровибратором.

Для доступа к узлам классификатора на лицевой стороне каркаса имеются две крышки и дверца, на которой смонтирован пульт управления установкой. Корпус камеры кипения сварен из винипласта. Снизу камеры между двумя металлическими сетками укреплено войлочное основание, служащее пористой перегородкой. Внутри корпуса установлена зарядная решетка с

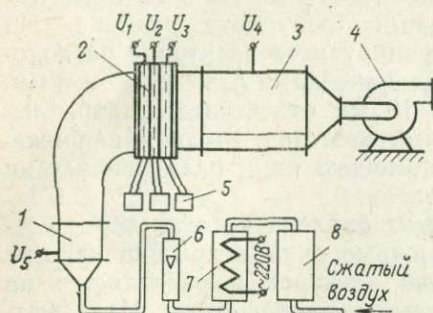


Рис. 49. Флюидизационно-электростатический классификатор:

1 — камера кипения; 2 — блок сетчатых электродов; 3 — электрофильтр; 4 — вытяжной вентилятор; 5 — приемники; 6 — ротаметр РС-7; 7 — осушитель; 8 — фильтр

контактом для подключения высоковольтного источника.

Блок сетчатых электродов собран из трех кассет из оргстекла. Каждая кассета переходит снизу в бункер для классифицированных порошков. В кассетах размещены металлические рамки с шестнадцатью мелкоструктурными сетками размером 85×85 мм в каждой. Блок сетчатых электродов резиновым патрубком соединяется с камерным электрофильтром. В результате исследования различных типов коронирующих электродов (рис. 50) выбран игольчатый электрод, имеющий оптимальную вольт-амперную характеристику и представляющий собой два параллельных металлических прутка длиной 350 мм и диаметром 6 мм. Прутки установлены на расстоянии 150 мм друг от друга. На каждом прутке с шагом 22,5 мм размещено семь игл высотой 30 мм. В нижней части корпуса электрофильтра установлен поддон, являющийся осадительным электродом.

Электрическая схема классификатора включает: пульт управления, высоковольтный источник положительной полярности для зарядания микропорошков и высоковольтный источник отрицательной полярности для питания электрофильтра и подачи напряжения на блок сетчатых электродов (через высокоомный делитель).

Пульт управления предназначен для запуска установки и регулировки технологического режима. В нем размещены также

элементы блокировки источников высокого напряжения для отключения их в случаях перегрузки. Блокировкой снабжены крышки и дверь установки. При их открывании снимается напряжение с классификатора.

Разработанные для электроклассификатора каскадные генераторы (на 50 кВ, 400 мкА) представляют собой однополярные источники постоянного тока высокого напряжения. Каждый ге-

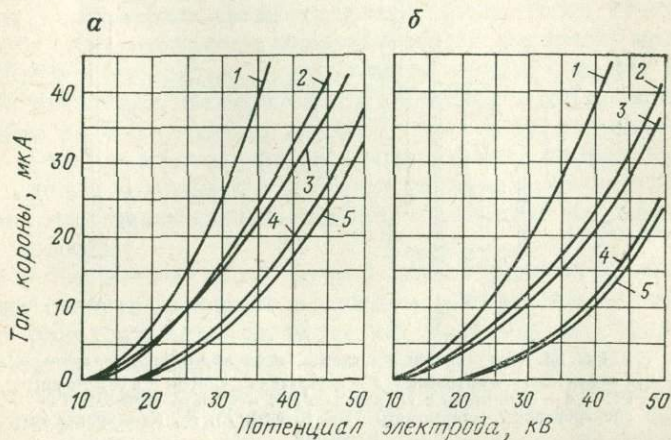


Рис. 50. Вольтамперные характеристики коронирующих электродов: а — отрицательная корона; б — положительная корона; 1 — два игольчатых электрода с шагом игл 22,5 мм; 2 — игольчатый электрод с шагом игл 22,5 мм; 3 — игольчатый электрод с шагом игл 45 мм; 4 — электрод с лезвиями высотой 10 мм; 5 — провод диаметром 0,2 мм

нератор состоит из блока умножения, собранного по двухпериодной (симметричной) схеме на селеновых выпрямителях 5ГЕ200 и конденсаторах КОБ-3, и высоковольтного трансформатора. Плавная регулировка выходного напряжения осуществляется автотрансформатором, выведенным на пульт управления классификатора.

Для предохранения селеновых выпрямителей от токов перегрузки и короткого замыкания применена максимальная токовая защита, выполненная на двух реле (РП-7 и РЭС-9). Выходное напряжение каскадного генератора измеряется добавочным высоковольтным сопротивлением, последовательно с которым включен токовый прибор М24, градуированный в киловольтах.

Каскадный генератор конструктивно выполнен в виде отдельных блоков: блока умножения напряжения, высоковольтного трансформатора и пульта управления. Последний смонтирован на двери классификатора. Здесь же установлен манометр для измерения давления воздуха в магистрали, к которой подключается классификатор. До поступления в установку воздух из ма-

гистрالي проходит через блок подготовки воздуха, пневматическая схема которого показана на рис. 51.

Первоначально воздух направляется в масловлагоотделитель С-418а, затем в осушитель с силикагелем, далее в фильтры ФЭВ-6М, где очищается от пыли, и, наконец, в нагреватель, после чего поступает в классификатор. Режим работы нагревателя регулируется контактным термометром, установленным на вы-

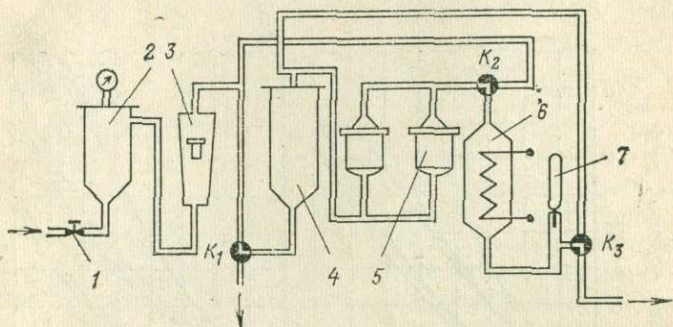


Рис. 51. Принципиальная схема блока подготовки воздуха:
1 — вентиль муфтовый; 2 — осушитель С-418а; 3 — ротаметр РС-7; 4 — осушитель с силикагелем; 5 — фильтр ФЭВ-6М; 6 — электропечь; 7 — термометр ТПК № 5-80; K_1 , K_2 , K_3 — краны управления

ходе блока. Силикагель периодически регенерируется. Для этого, переключая краны управления, воздух из осушителя С-418а подают в нагреватель и из него — в силикагелевый осушитель, где отбирается влага. После регенерации краны управления устанавливаются в первоначальное положение, силикагель остывает, блок готов к работе.

На флюидизационно-электростатическом классификаторе последней конструкции обрабатывались отдельные операции технологического процесса классификации различных токодисперсных материалов и изучались факторы, влияющие на параметры флюидизационно-электростатической классификации.

2. Классификация тонкодисперсных материалов и контроль процесса

Электрические классификаторы с фокусирующими электростатическими полями применяются для разделения на узкие фракции различных порошковых материалов: диэлектриков, полупроводников и проводников.

При флюидизационно-электростатической классификации микропорошков гранулометрический состав исходных проб и продуктов классификации определялся микроскопическими методами с помощью оптических микроскопов сильного увеличения

(до 2000 при визуальном наблюдении) или с применением электронных микроскопов, так как определить размер частицы меньше 2 мкм оптическим микроскопом практически невозможно. Для экспресс-анализов использовался также турбидиметр. Результаты классификации можно контролировать с помощью счетчика Коултера, люминесцентно-оптическим методом и др.

Порошки для микроскопических исследований должны быть определенным образом подготовлены. Частицы должны располагаться равномерно по поверхности предметного стекла или пленки без образования агломератов. В то же время желательно, чтобы в поле зрения находилось возможно большее их число. Приготовление препаратов крупнодисперсных материалов с частицами размером свыше 50—100 мкм не представляет трудностей. С уменьшением размеров возрастают адгезионные силы, приводящие к коагуляции. Поэтому основной задачей приготовления тонкодисперсных порошков является их тщательное диспергирование.

Следует отметить, что в связи с разнообразием физико-механических свойств порошков в каждом конкретном случае необходимо разрабатывать специальную методику их приготовления. Весь гранулометрический состав микропорошков определялся с помощью отечественной аппаратуры: универсального исследовательского микроскопа МБИ-6 (с максимальным увеличением 2250) и электронного микроскопа с полем зрения диаметром около 25 мкм при увеличении 5250.

Существующие методы приготовления препаратов тонкодисперсных материалов можно объединить в три основные группы: осаждение порошка из суспензии на подложку распылением или методом петли [101]; нанесение заряженных частиц порошка на подложку, которая находится под потенциалом с полярностью, противоположной знаку заряда порошка; растирание порошка на подложке в жидкости, хорошо смачивающей поверхность частиц.

На основе такой классификации и в зависимости от физико-химических свойств исследуемых материалов были разработаны следующие способы приготовления препаратов:

1. Частицы металлических порошков, карбида кремния, корунда и других материалов, имеющих слабо развитую поверхность, удовлетворительно диспергируются при растирании в жидкости, хорошо смачивающей их поверхность. К таким жидкостям относятся касторовое масло, скипидар, бальзам, этиловый спирт и др. Для приготовления препаратов в этом случае небольшое количество исследуемого порошка помещают на предметное стекло, наносят на него несколько капель жидкости, например касторового масла, и специальной иглой тщательно растирают образовавшуюся густую массу. Затем сверху этот слой накрывают покровным стеклом. Равномерными круговыми движениями покровного стекла растирают массу в тече-

ние нескольких минут, после чего препарат готов для микроскопических исследований. Концентрация частиц на предметном стекле должна быть такой, чтобы в поле зрения микроскопа находилось одновременно несколько сотен их.

2. Для порошков полимерных материалов (поливинилбутирала, полиэтилена, поливинилхлорида и др.), а также для многих марок люминофора, между частицами которых действуют значительные силы аутогезии, не удалось подобрать жидкость, хорошо смачивающую их поверхность и не вступающую в химическое взаимодействие с материалом. Кроме того, вследствие незначительного различия коэффициентов поглощения света у этих веществ и у применявшихся для диспергирования жидкостей изображение получалось слабоконтрастным, а мелкие частицы вообще не просматривались. Удовлетворительные результаты были получены при использовании ультразвуковых колебаний.

Приготовление препарата производится следующим образом: на поверхность предметного стекла наносится небольшое количество исследуемого порошка, стекло закрепляется на площадке экспоненциального концентратора диспергатора УЗДН-1. Диспергатор должен быть предварительно настроен в резонанс по максимуму кавитационного шума. Рабочая частота диспергатора 35 кГц. Время обработки препарата от 1 до 5 мин (в зависимости от свойств диспергируемого порошка). При исследовании относительно крупнодисперсных материалов рабочая частота снижалась до 25 кГц.

3. Как уже отмечалось, порошки с частицами менее 2 мкм исследуются с помощью электронного микроскопа. Приготовление препаратов для просмотра под электронным микроскопом представляет значительные трудности. Применять непосредственно в микроскопе суспензии из порошка и поверхностно-активных веществ нельзя. Ультразвуковые колебания не диспергируют такие мелкодисперсные материалы в сухом виде. Поэтому для препарирования мелкодисперсных материалов суспензия готовится предварительно.

Слабо концентрированная суспензия из исследуемого порошка и дистиллированной воды обрабатывается ультразвуковыми колебаниями частотой 35 кГц. Затем с помощью металлической петли диаметром 3 мм суспензия наносится на заранее подготовленную пленку. Для стабилизации в нее добавляются в небольших количествах пептизаторы (жидкое стекло или щелок). С помощью оптического микроскопа на пленке выбираются участки, где порошок полностью диспергирован. Эти участки вырубаются специальным штампом для просмотра под электронным микроскопом.

4. В ряде случаев добавление в водную суспензию пептизаторов не дает желаемого эффекта, поэтому приходится использовать другие легко испаряющиеся жидкости с меньшим,

чем у воды, коэффициентом поверхностного натяжения. К ним относятся спирты, в частности обезвоженный этиловый спирт. При использовании в качестве жидкой среды этилового спирта обработанная ультразвуком суспензия наносится на пленку иглой. Эта операция производится достаточно быстро во избежание испарения спирта с поверхности иглы.

Таким образом, можно рекомендовать следующие методы препарирования тонкодисперсных порошков: сухой с диспергированием ультразвуковыми колебаниями — для порошков полимерных материалов; растирание в касторовом масле и скипидаре — для диэлектрических порошков типа корунда, полупроводниковых материалов типа карбида кремния и для металлических порошков; растирание порошков в среде этилового спирта — для полупроводниковых веществ типа люминофоров; приготовление водной, спирто-водной и спиртовой суспензии с обработкой ее ультразвуком — для исследований субмикронных порошков под электронным микроскопом.

Карбид кремния. Исследование флюидизационно-электростатического метода классификации проводилось на микропорошках карбида кремния (зеленый КЗ), выпускаемого абразивной промышленностью. Гранулометрический состав исходных проб приведен в табл. 7. Наименование порошков абразивов и их фракций в дальнейшем дается согласно ГОСТ 3647—71 [102].

ТАБЛИЦА 7

Гранулометрический состав исходных проб карбида кремния марки КЗ

Фракция	Проба № 1 (КЗ № М28)		Проба № 2 (КЗ № М20)		Проба № 3 (КЗ № М14)		Проба № 4 (КЗ № М10)	
	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %
Предельная	63—40	5,4	40—28	12,3	28—20	12,2	20—14	7,5
Крупная	40—28	32,8	28—20	26,9	20—14	24,7	14—10	15,1
Основная	28—20	32,3	20—14	51,7	14—10	45,1	10—7	47,4
Комплексная	28—14	58,2	20—10	56,8	14—7	56,3	10—5	69,1
Мелкая	< 14	3,6	< 10	4,0	< 7	6,8	< 5	8,3

Как видно, в пробах, полученных методом гидроклассификации, содержатся частицы предельной и крупной фракции.

На лабораторной установке (см. рис. 46) классифицировался порошок карбида кремния (пробы № 2 и 3). В экспериментах использовались сетчатые электроды с ячейками размером 24, 12 и 10 мкм. Для создания электростатического поля за последней мелкоструктурной сеткой устанавливался

дополнительный электрод с отверстиями 1 мм. При классификации устанавливались сетчатые электроды с ячейками 24, 12 мкм и 1 мм для пробы № 2 и с ячейками 10 мкм и 1 мм — для пробы № 3. Результаты классификации приведены в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8

Результаты классификации карбида кремния марки КЗ на лабораторной установке, % по массе

№ пробы	Продукт	Фракция, мкм						
		40—28	28—20	20—14	14—10	10—7	7—5	—5
2	Порошок за сеткой: 24 мкм	—	67,9	20,3	9,8	1,5	0,3	0,2
	12 мкм	—	—	—	69,3	17,2	10,1	3,4
3	Исходный	12,3	26,9	51,7	5,1	2,1	1,5	0,4
	Порошок за сеткой: 10 мкм	—	—	—	—	64,2	23,2	12,6
	Исходный	—	12,2	24,7	45,1	11,2	5,4	1,4

На зарядный электрод подавался положительный потенциал 10 кВ, а на сетчатые электроды и электрофильтр — отрицательный. На первый (по ходу воздушного потока) электрод подавался потенциал 3 кВ, на второй 10 кВ и на послед- 25 кВ. На коронирующие электроды электрофильтра подавалось напряжение 30 кВ.

Повторные опыты проводились при различных потенциалах на электродах. Для выяснения влияния электрического поля на процесс классификации в отдельных опытах напряжение на электроды не подавалось. В отсутствие поля ячейки сетчатых электродов быстро забивались частицами классифицируемого материала. При подаче напряжения на сетчатые электроды забивание ячеек уменьшалось, при этом осевшие на электроды частицы легко удалялись при встряхивании сеток. Наилучшие результаты получены при напряженности поля перед сетчатым электродом, значительно меньшей напряженности поля за электродом.

При экспериментах с пробой № 1 на флюидизационно-электростатическом классификаторе (см. рис. 49) устанавливали сетчатые электроды с ячейками 25, 18 и 12 мкм; при экспериментах с пробой № 2 — 18 и 12 мкм и с пробой № 3 — 12 и 8 мкм. Проба № 4 классифицировалась с использованием электродов с ячейками 8 и 6 мкм.

При классификации пробы № 1 получены фракции: —28, —20, —14 мкм, а пробы № 2: —20 и —14 мкм. Из пробы № 3 отбирались фракции —14 и —10 мкм, а из пробы № 4 —10 и —7 мкм.

ТАБЛИЦА 9

Результаты классификации микропорошка карбида кремния марки КЗ, % по массе

№ п проб	Продукт	Выход	Фракция, мкм							Эффектив- ность
			63—28	28—20	20—14	14—10	10—7	7—5	—5	
1	Фракция:									
	I (—28 мкм)	35,4	—	78,6	19,8	1,2	0,2	~0,1	<0,1	96,9
	II (—20 мкм)	27,8	—	—	84,7	12,2	1,6	0,9	0,6	
	III (—14 мкм)	10,1	—	—	—	87,2	9,8	2,8	0,2	
	Фракции I—III	73,3								
Остаток	26,7	65,1	28,3	6,2	0,3	0,1	~0,1	<0,1		
	Исходный	100,0	5,4	32,8	37,3	20,9	3,0	0,4	0,2	
2	Фракция:									
	I (—20 мкм)	36,2	—	—	72,9	18,7	7,2	1,1	0,1	92,2
	II (—14 мкм)	29,4	—	—	—	76,4	17,3	5,1	1,2	
	Фракция I—II	65,6								
	Остаток	34,4	20,3	58,1	15,7	4,5	1,2	<0,1	<0,1	
Исходный	100,0	12,3	26,9	51,7	5,1	2,1	1,5	0,4		
3	Фракция:									
	I (—14 мкм)	37,1	—	—	—	78,8	20,1	0,7	0,4	90,4
	II (—10 мкм)	28,3	—	—	—	—	69,5	21,6	8,9	
	Фракции I—II	65,4								
	Остаток	34,6	—	42,3	43,7	11,7	1,3	0,6	0,4	
Исходный	100,0	—	12,2	24,7	45,1	11,2	5,4	4,1		
4	Фракция:									
	I (—10 мкм)	35,7	—	—	—	—	65,4	24,9	9,7	93,9
	II (—7 мкм)	23,1	—	—	—	—	—	65,3	34,7	
	Фракции I—II	58,8								
	Остаток	41,2	—	—	24,2	58,6	13,3	2,7	1,2	
Исходный	100,0	—	—	7,5	15,1	47,4	21,7	8,3		

Гранулометрический состав продуктов классификации проб № 1—4 приведен в табл. 9. Как видно, продукты классификации не содержат частиц крупной и предельной фракций и в полученных флюидизационно-электростатическим методом микропорошках имеется резкая граница по крупному зерну.

Электрокорунд белый производства Ленинградского абразивного завода «Ильич» разделялся на фракции с использованием тех же сетчатых электродов, которые применялись при классификации карбида кремния. Гранулометрический состав исходных проб приведен в табл. 10.

ТАБЛИЦА 10

Гранулометрический состав исходных проб электрокорунда белого марки ЭБ, %

Фракция	Проба № 5 (ЭБ № М28)		Проба № 6 (ЭБ № М20)	
	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %
Предельная	63—40	3,2	40—28	6,2
Крупная	40—28	14,6	28—20	12,2
Основная	28—20	52,6	20—14	51,4
Комплексная	28—14	74,7	20—10	73,5
Мелкая	<14	7,5	<10	8,1

Продолжение табл. 10

Фракция	Проба № 7 (ЭБ № М14)		Проба № 8 (ЭБ № М10)	
	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %	Размер зерен, мкм	Содержание по массе, %
Предельная	28—20	10,3	20—14	5,9
Крупная	20—14	9,5	14—10	7,6
Основная	14—10	50,8	10—7	54,9
Комплексная	14—7	72,7	10—5	78,1
Мелкая	<7	7,5	<5	8,4

Разделение микропорошка электрокорунда белого проводилось вначале на лабораторной установке (см. рис. 46) с целью отработки параметров процесса, а затем на флюидизационно-электростатическом классификаторе (см. рис. 49). Результаты классификации приведены в табл. 11 и 12.

ТАБЛИЦА 11

Результаты классификации электрокорунда белого марки ЭБ
на лабораторной установке, % по массе

№ пробы	Продукт	Фракция, мкм						
		40—28	28—20	20—14	14—10	10—7	7—5	—5
6	Порошок за сеткой: 24 мкм	—	68,7	15,9	10,5	3,7	1,0	0,2
	12 мкм	—	—	—	65,5	19,1	12,8	3,6
	Исходный	6,2	12,2	51,4	22,1	5,1	2,6	0,4
7	Порошок за сеткой 10 мкм	—	—	—	—	66,8	19,7	13,5
	Исходный	—	10,3	9,5	50,8	21,9	4,5	3,0

Исследованиями по выбору параметров классификации карбида кремния и электрокорунда установлено, что для получения порошков, не содержащих крупной и предельной фракций (ГОСТ 3647—71), необходимо размеры ячеек сетчатых электродов выбирать на несколько микрон меньше максимального размера частиц основной фракции.

Для успешной классификации микропорошки перед загрузкой в камеру кипения необходимо просушивать. В продуктах электроклассификации, полученных из более крупного исходного микропорошка, содержится больше основной фракции, чем в продуктах, полученных из мелкозернистого порошка.

Установлено, что основными факторами, влияющими на производительность электроклассификатора, являются: скорость воздушного потока в камере кипения, напряженность электростатического поля между сетчатыми электродами, гранулометрический состав, температура и влажность исходного микропорошка, частота встряхивания сетчатых электродов. Производительность классификатора увеличивается с увеличением скорости воздуха и повышением напряженности поля между сетчатыми электродами.

Верхний предел скорости воздуха в камере кипения зависит от пропускной способности последнего (по ходу воздушного потока) сетчатого электрода с ячейками наименьшего размера.

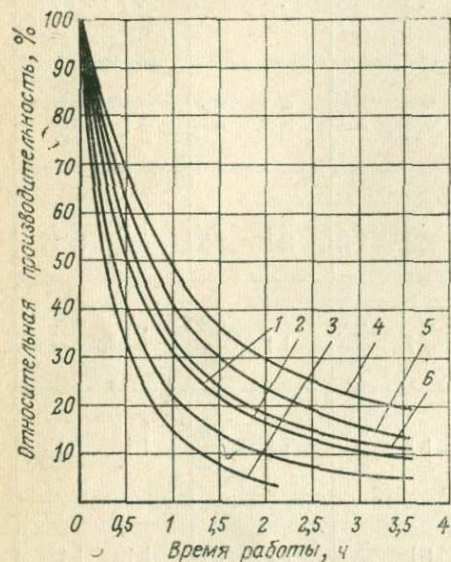


Рис. 52. Зависимость относительной производительности классификатора от времени его работы при использовании неосушенного воздуха:

1 — проба № 1; 2 — проба № 2; 3 — проба № 3;
4 — проба № 5; 5 — проба № 6; 6 — проба № 7

При исследовании режимов работы флюидизационно-электростатического классификатора определялось влияние влажности воздуха, поступающего в камеру кипения, на производительность процесса классификации. Опыты проводились с просушенными пробами № 1—3 и 5—7. При подаче в классификатор воздуха относительной влажностью 70—75% и температурой 20°С производительность классификатора с течением времени резко падала (рис. 52). При использовании осушенного и нагретого до 90°С воздуха процесс классификации был стабильным во времени и производительность увеличивалась в

4—5 раз по сравнению с экспериментами, в которых применялся неосушенный воздух. Уменьшение производительности объясняется ухудшением процесса кипения и уменьшением заряда частиц в результате повышения влажности порошков. Действительно, как показали измерения, влажность порошков возрастает в процессе классификации от нуля до нескольких десятых процента.

Определялась также зависимость гранулометрического состава продуктов классификации от скорости воздуха в камере кипения (табл. 13).

ТАБЛИЦА 13
Зависимость гранулометрического состава продуктов классификации от скорости воздуха в камере кипения

№ пробы	Скорость воздуха, см/с	Содержание по массе (в %) фракции, мкм				
		28—20	20—14	14—10	10—5	—5
5	5	54,6	29,7	9,5	5,4	0,8
	7	57,3	28,4	7,9	5,7	0,7
	8,5	60,8	24,3	10,0	4,2	0,7
	10	64,6	26,6	6,6	2,1	0,1
	13	74,5	20,7	3,7	1,0	0,1
6	5	—	54,7	28,0	15,3	2,0
	7	—	65,8	19,4	11,1	3,7
	8,5	—	75,0	22,4	2,2	0,4
	10	—	81,8	15,1	2,9	0,3
	13	—	85,2	11,6	2,9	0,3

С увеличением скорости воздуха в камере кипения увеличивается выход основной фракции в продуктах классификации, что, по-видимому, связано с возрастанием вероятности выноса наиболее крупных частиц из кипящего слоя.

Аналогичная зависимость получена при классификации проб № 1, 2, 3 и 7.

В экспериментах определялась зависимость гранулометрического состава продуктов классификации от продолжительности кипения порошка. В классификатор загружалось 5—7 кг исходного продукта в зависимости от номера порошка. На протяжении опыта условия классификации не изменялись. Показано (рис. 53), что с увеличением времени кипения содержание основной фракции увеличивается от 50—70 до 80—90%. Объясняется это тем, что при кипении порошка в камере из слоя уносятся в первую очередь мелкие частицы, в результате чего происходит обогащение порошка в кипящем слое крупными частицами. Увеличение их числа в слое приводит к росту вероятности выноса частиц из камеры кипения. Ана-

лиз гранулометрического состава остатка порошка в камере кипения подтверждает этот вывод. В качестве примера в табл. 14 показано изменение фракционного состава остатка пробы № 6 в процессе кипения.

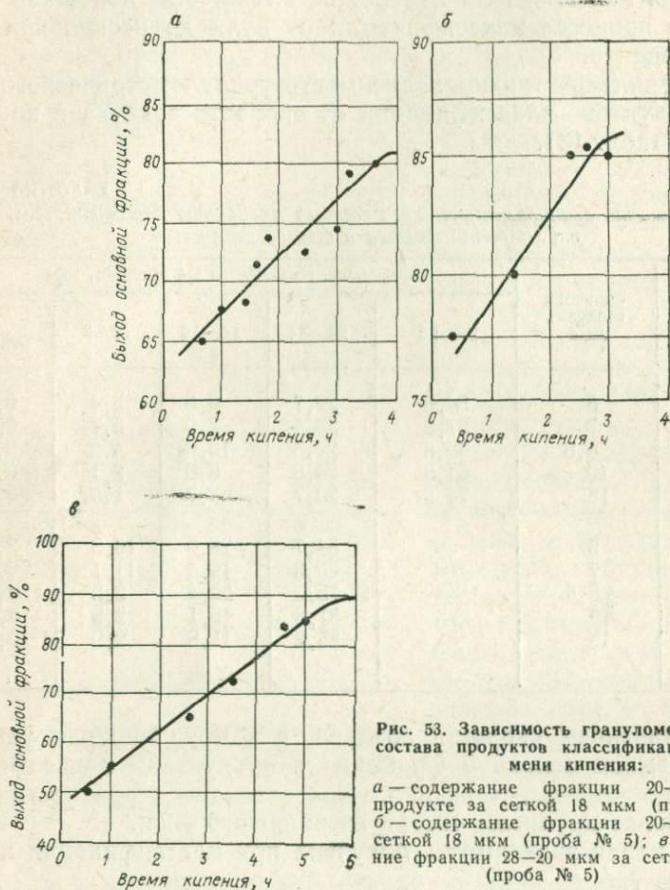


Рис. 53. Зависимость гранулометрического состава продуктов классификации от времени кипения:

а — содержание фракции 20—14 мкм в продукте за сеткой 18 мкм (проба № 6);
 б — содержание фракции 20—14 мкм за сеткой 18 мкм (проба № 5);
 в — содержание фракции 28—20 мкм за сеткой 25 мкм (проба № 5)

Максимальная величина напряженности поля между электродами ограничивается появлением электрических разрядов. Конструкция блока сетчатых электродов электроклассификатора позволяла поддерживать напряженность поля 10 кВ/см.

С увеличением температуры порошка и уменьшением его влажности улучшается флюидизация микропорошков в кипящем слое и увеличивается заряд частиц, что способствует интенсификации процесса классификации.

Установлена прямая пропорциональная зависимость между крупностью исходного материала и производительностью

Изменение гранулометрического состава остатка пробы в процессе кипения

Время кипения, ч	Содержание по массе (в %) фракции, мкм				
	40—28	28—20	20—14	14—10	—10
0	6,2	12,2	51,4	22,1	8,1
1	8,3	37,5	45,4	6,3	2,5
2	9,1	49,0	31,7	8,5	1,7
3	10,3	59,4	23,0	6,2	1,1

установки. Это, объясняется тем, что с ростом крупности микророзношка улучшаются условия его флюидизации в кипящем слое и что по мере увеличения размера ячеек сетки возрастает пропускная способность сетчатого электрода. Оптимальная частота встряхивания сетчатых электродов составляет 1—2 Гц.

В процессе проведения экспериментальных работ на электроклассификаторе определялся износ сетчатых электродов. В связи с этим изучалась под микроскопом поверхность прутков сетчатых электродов, определялись размеры последних до их установки в классификатор и через месяц непрерывной работы ее. При этом каких-либо заметных повреждений сетки не обнаружено.

Синтетические алмазы марки АСМ [103], полученные в Институте синтетических сверхтвердых материалов и инструментов (г. Киев), классифицировались на электростатическом сепараторе с фокусирующим полем (см. рис. 48).

Исходный состав алмазного порошка марки АСМ

Фракция, мкм	125—100	100—80	80—63	63—50	50—40	40—28	28—20	20—10	—10
Состав, % (по числу частиц)	1	4	10	15	18	21	12	9	10

На сепараторе одновременно получали 4 фракции. Классифицирующие электроды имели размеры ячеек 70, 40, 24 и 12 мкм. В ходе опытов определялись гранулометрический состав получаемых фракций, продолжительность классификации, оптимальные электрические режимы сепаратора и степень извлечения отдельных фракций из исходного порошка. Результаты классификации алмазного порошка приведены в табл. 15. Установлена возможность отделения зерен крупнее определенного размера от остальной массы алмазного порошка. Полное отделения мелких фракций добиться не удалось, однако содержание их в классифицированном порошке находится в

Гранулометрический состав и выход классифицированных алмазных порошков марки АСМ, % (по числу частиц)

Продукт	Размер ячеек сетки, мкм	Фракция, мкм											Выход по массе, %	
		125—100	100—80	80—63	63—50	50—40	40—28	28—20	20—14	20—10	14—10	—10		
Надрешетный: I (на первом электроде)	70	4,0	26,0	48,0	22,0	—	—	—	—	—	—	—	1,3	
II (на втором электроде)	40	—	—	18,4	15,0	16,6	14,0	16,0	—	12,0	—	8,0	23,4	
III (на третьем электроде)	24	—	—	—	3,0	12,0	30,0	37,0	—	12,0	—	11,0	55,9	
IV (на четвертом электроде)	12	—	—	—	—	—	5,0	61,0	—	18,0	—	16,0	16,9	
Подрешетный (после четвертого электрода)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,0	—	61,0	16,0	2,5

пределах допустимых норм. Интенсивность классификации сепаратора падает с уменьшением размеров ячеек сетчатых электродов, как и при классификации порошков на флюидизационно-электростатическом классификаторе. Падение производительности объясняется уменьшением прозрачности сетчатых электродов при переходе на более мелкие сетки и увеличением адгезионных сил, препятствующих проникновению частиц алмаза сквозь классифицирующий электрод.

Степень оптимизации электрических параметров процесса классификации оценивалась по массовому выходу классифицированного порошка соответствующей фракции.

Изучалась также возможность удаления зерен крупной фракции из порошков синтетических алмазов, близких к кондиционным. Для этой цели использовалась электромеханическая установка с фокусирующими электростатическими полями (см. рис. 47).

До кондиции доводились микропорошки марки АСМ 40/28, АСМ 28/20, АСМ 14/10 и АСМ 10/7, содержащие повышенный процент зерен крупной фракции, а также зерна предельной фракции (см. МРТУ2-037-4—65).

Результаты доводочной классификации приведены в табл. 16. Для каждой марки порошка подбирались оптимальные электрические режимы классификации, обеспечивающие

ТАБЛИЦА 16

Результаты доводочной классификации алмазных порошков марки АСМ

Марка порошка	Продукт	Состав по фракциям, %				Выход (в %) при классификации	
		предельная	крупная	основная	дополнительная	электрической	механической
АСМ 40/28	Надрешетный	3,0	34,0	57,0	6,0	2,7	7,9
	Подрешетный	—	8,0	86,0	6,0	97,3	92,1
	Исходный	3,0	23,0	64,0	10,0	100,0	100,0
АСМ 28/20	Надрешетный	1,0	53,0	46,0	—	16,2	31,1
	Подрешетный	—	4,0	65,0	31,0	83,8	68,9
	Исходный	1,0	6,0	68,0	25,0	100,0	100,0
АСМ 10/7	Надрешетный	1 зерно	11,0	74,0	15,0	38,7	80,3
	Подрешетный	—	4,0	75,0	21,0	61,3	19,7
	Исходный	1 зерно	7,0	74,0	19,0	100,0	100,0

наиболее интенсивное прохождение через отверстия сетчатого электрода частиц порошка. Определялся также выход подрешетного продукта классификации в зависимости от продолжительности процесса. Некоторые результаты исследований приведены на рис. 54. Данные классификации в фокусирующих электростатических полях сравнивались с результатами механического отсева порошков

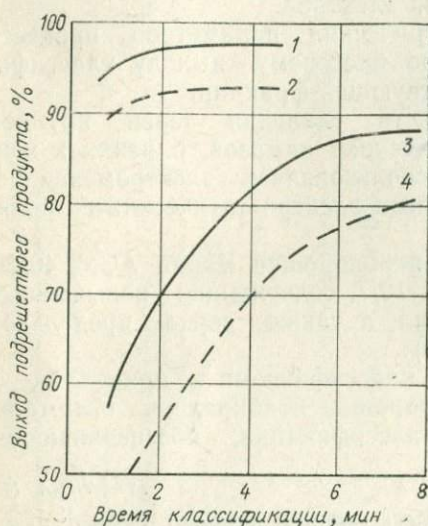


Рис. 54. Зависимость выхода подрешетного продукта алмазного порошка от продолжительности классификации:

1 и 2 — порошок марки АСМ 40/28; 3 и 4 — порошок марки АСМ 28/20; (сплошные линии — электрическая классификация; пунктирные линии — механическая классификация)

без использования электрических полей. Как видно из рис. 54, при использовании фокусирующих полей через сетчатые электроды проходит в среднем на 10—15% больше порошка по сравнению с механическим просеиванием. При одинаковом максимальном выходе классифицированного порошка продолжительность электростатической классификации оказалась в 1,5—2 раза меньше, чем механической. В зависимости от зернистости и содержания крупной фракции в исходном порошке, толщины прутков сетчатого электрода и других факторов выход нижнего продукта классификации составлял от 62% для порошка АСМ 10/7 до 97% для порошка АСМ 40/28.

При экспериментально найденном оптимальном времени электрической классификации

определялся гранулометрический состав верхнего (надрешетного) и нижнего (подрешетного) продуктов и подсчитывался их выход. Для сравнения в табл. 16 приведены данные о выходе нижнего и верхнего продуктов при классификации алмазных микропорошков на ситах, ячейки которых имеют те же размеры, что и классифицирующие электроды электроклассификатора. Размер зерен определялся как полусумма длины и ширины проекции зерна на плоскость.

Электрографический порошок ПСК-14 на основе сплава идитола с полиамидной смолой с добавлением родамина Ж разделялся на электромеханическом классификаторе с фокусирующими полями (см. рис. 47). Размер частиц и их гранулометрический состав являются одними из основных параметров электрографического проявителя, от которого во многом зависит качество проявленного изображения. Круп-

ные частицы, содержащиеся в проявителе, обычно искажают изображение, а мелкие частицы очень часто образуют фон. Поэтому желательно применять проявляющие порошки с узким разбросом размеров частиц.

Результаты классификации порошка ПСК-14 приведены в табл. 17.

ТАБЛИЦА 17

Результаты классификации порошка ПСК-14, % (по числу частиц)

Продукт	Фракция, мкм							
	90—60	60—40	40—28	28—20	20—14	14—10	10—7	—7
Классифицированный порошок	—	—	—	—	4,2	22,8	45,4	27,6
Исходный порошок	1,6	3,1	7,5	11,1	11,5	16,0	29,1	20,1

В установке использовался классифицирующий сетчатый электрод с ячейками размером 12 мкм. Классифицированный порошок не содержит крупных частиц и отвечает требованиям, предъявляемым к электрографическим проявителям.

3. Применение флюидизационно-электростатической классификации для обработки алмазов, абразивов, люминофоров, черновых концентратов и других материалов

Электростатические классификаторы с фокусирующими полями применяются для разделения на узкие фракции диэлектрических, полупроводниковых и проводящих тонкодисперсных материалов. Точность классификации имеет особенно большое значение для алмазных и абразивных микропорошков.

Синтетические алмазы находят все большее распространение при производстве алмазно-абразивного инструмента, паст и порошков, применяемых для заточки, резки, шлифовки и полировки изделий из твердых сплавов, кварца, германия, стекла и других материалов.

При этом качество обрабатываемых поверхностей значительно улучшается при использовании алмазных порошков узких фракций. Традиционные методы (гидроклассификация и центрифугирование) не позволяют получать порошки с однородным зерновым составом.

Флюидизационно-электростатической классификацией получают кондиционные алмазные микропорошки требуемого гранулометрического состава. Выход продуктов классифика-

ции при использовании фокусирующих электростатических полей для порошков АСМ 40/28—АСМ 10/7 на 6—200% выше, чем при механическом просеивании. В этом случае эффективность классификации повышается в 1,5—2 раза.

Влияние электрического поля возрастает с уменьшением крупности порошка. Извлечение заданных классов крупности определяется выбором оптимальных электрических параметров: напряженности поля, величины и полярности подаваемых на электроды потенциалов.

Выпускаемые в настоящее время абразивные микропорошки имеют неоднородный зерновой состав и не удовлетворяют требованиям полупроводниковой, пьезокварцевой, электровакуумной и других отраслей промышленности. Даже небольшое количество крупных частиц, превышающих верхний предел заданной крупности данной фракции, в абразивных порошках увеличивает толщину рельефного и разрушенного слоев, снижает производительность процесса шлифования, увеличивает расход остродефицитного сырья и сопровождается отбраковкой большого количества готовых изделий.

Улучшение параметров, увеличение надежности и долговечности работы приборов и аппаратуры для различных отраслей автоматики, телемеханики и радиоэлектроники может быть достигнуто повышением точности размеров и чистоты обработки поверхности путем использования высококачественных абразивных материалов.

Флюидизационно-электростатической классификацией для нужд промышленности получают абразивные микропорошки заданной крупности, практически не содержащие крупных частиц. Схема электроклассификации абразивных микропорошков показана на рис. 55.

Данные о производительности опытного классификатора абразивных порошков приведены в табл. 18. Производительность определялась по количеству продукта классификации, получаемого после первого сетчатого электрода. Следует учитывать, что при одновременном получении нескольких фракций общая производительность классификатора больше указанной в табл. 18. Так, например, при получении из пробы № 5 фракций —28, —20 и

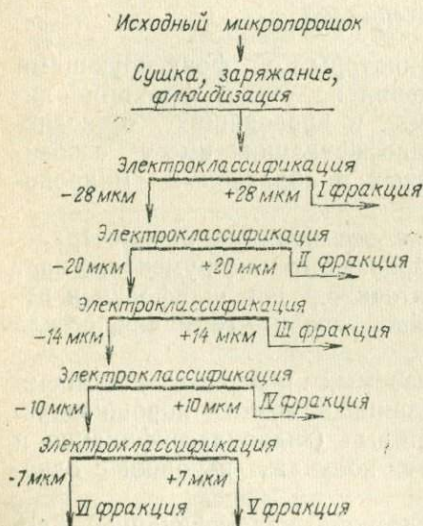


Рис. 55. Схема электроклассификации абразивных микропорошков

— 14 мкм общая производительность составляет 85,8 кг с 1 м² сетчатого электрода в смену.

Содержание основной фракции в продуктах электроклассификации достигает 70—80%, в то время как в продуктах гидроклассификации их всего 40—60%. Остаток микропорошка в камере кипения также пригоден для шлифовки изделий, так как гранулометрический состав его удовлетворяет требованиям ГОСТ 3647—71 на образивные микропорошки.

Гранулометрический состав продуктов классификации зависит от крупности исходного материала. Так, в продукте классификации, полученном из более крупного микропорошка, содержание основной фракции больше, чем из более мелкого.

Производительность процесса классификации прямо пропорциональна скорости воздуха в камере кипения, напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве, а также температуре и влажности классифицируемого материала. Для стабильности процесса классификации необходимо подаваемый в камеры кипения воздух осушать и нагревать до 80—90° С. Флюидизационно-электростатический процесс классификации позволяет одновременно получать несколько фракций заданного гранулометрического состава.

Порошки люминофоров, однородных по гранулометрическому составу зерен, улучшают яркостные характеристики люминесцентных покрытий, их однородность и разрешающую способность. Повышение яркости свечения экранов важно для трубок цветного телевидения с теневой маской, так как в них полезно используется только около 15% энергии электронного луча.

Электростатическая классификация люминофоров в фокусирующих полях позволяет отделить от основной массы порошка крупные частицы и уменьшить содержание мелкой фракции, состоящей из зерен с разрушенной кристаллической решеткой, а следовательно, и с пониженной яркостью свечения.

Флюидизационно-электростатический метод классификации пригоден для доводки и обогащения редкоземельных и других концентратов, в которых ценные минералы концентри-

ТАБЛИЦА 18
Производительность классификатора

№ пробы	Размер, мкм		Удельная производительность на 1 м ² сетчатого электрода в смену (7 ч), кг
	исходного материала	продукта классификации	
1	—63	—28	42,0
2	—40	—20	21,0
3	—28	—14	7,8
4	—20	—10	3,5
4	—20	—7	1,7
5	—63	—28	42,5
6	—40	—20	21,7
7	—28	—14	8,6
8	—20	—10	4,3

руются в классах определенной крупности. Например, электроклассификации лейкоксен-рутил-цирконового концентрата, полученного при обогащении ильменит-рутил-цирконовых песков одного из западносибирских месторождений, позволяет получать фракцию —50 мкм, являющуюся кондиционным цирконовым концентратом, и фракцию 50—100 мкм, содержащую около 70% циркона, 10% лейкоксена, 5% рутила, 15% кварца и др.

Предварительной электроклассификацией вольфрамового черного концентрата можно выделить фракцию мельче 80 мкм, богатую по содержанию WO_3 , что способствует более полному извлечению вольфрамита при последующем обогащении.

Классификацией обогащается касситеритовый продукт (Джидинское месторождение), содержащий около 26% SnO_2 , а также вольфрамит и гюбнерит (около 25%), магнетит, лимонит и гематит (28%), гранат (5%), сфен, турмалин, флюорит и кварц, путем выделения фракции мельче 60 мкм с меньшим содержанием касситерита. Повышение содержания олова в концентрате обеспечивает более полное извлечение его при плавке и увеличивает производительность плавильных агрегатов.

Электрическая классификация танталит-турмалин-гранатового продукта крупностью 0,3 мм, содержащего 25—35% кварца и полевых шпатов, 8—12% турмалина, 17—25% граната, 2% касситерита и 25—38% танталита, позволяет выделить класс —100 мкм с содержанием танталита свыше 50%.

При предварительной классификации измельченной сфалеритовой руды в дальнейшем получают концентрат, содержащий около 80% сфалерита.

Флюидизационно-электростатическую классификацию можно применять при исследовании шламов различных минералов и изучении распределения по фракциям ценных компонентов.

Флюидизационно-электростатический метод классификации — высокоэффективный процесс, имеющий значительные технические и экономические преимущества. Техничко-экономический эффект от использования флюидизационно-электростатического метода классификации можно проиллюстрировать на примере классификации электрокорунда. За основу принят технологический процесс одного из заводов, выпускающего кварцевые резонаторы. Так как поставляемые абразивной промышленностью микропорошки не однородны по зерновому составу, то на заводе они подвергаются дополнительной классификации гравитационным методом. Замена традиционного технологического процесса флюидизационно-электростатической классификацией абразивных микропорошков и применение разработанного на ее основе технологического оборудования обеспечивает получение экономического эффекта при производстве кварцевых резонаторов в сумме свыше 700 тыс. руб. в год. Срок окупаемости оборудования составляет несколько месяцев.

Основные преимущества флюидизационно-электростатического метода проявляются при выпуске изделий, обработанных электроклассифицированными микропорошками. Отсутствие в порошках крупных частиц обеспечивает достижение более ровной поверхности изделий, что снижает брак изделий, время их обработки.

Вновь созданное технологическое оборудование имеет ряд качественных преимуществ по сравнению с существующим. При применении электроклассифицированных порошков скорость шлифовки изделий повышается на 10—15%, припуски на обработку снижаются почти на 50%, значительно уменьшается расход дорогостоящего материала изделий, повышается культура производства и др.

4. Обслуживание классификаторов и техника безопасности

Электростатические классификаторы с фокусирующими полями работают при напряжении на электродах несколько десятков киловольт, поэтому к управлению и обслуживанию классификаторов допускаются лица, имеющие право работать с электрическими установками напряжением свыше 1000 В, ознакомленные с их конструкцией и инструкцией по эксплуатации.

Классификаторы рассчитаны для работы в закрытых производственных помещениях с температурой окружающего воздуха $20 \pm 5^\circ \text{C}$ и относительной влажностью до 85%.

Во флюидизационно-электростатических классификаторах наиболее рациональны каскадные генераторы постоянного высокого напряжения на полупроводниках, собираемые из стандартных низковольтных элементов, относительно дешевые и имеющие сравнительно высокий к. п. д. (50—70%). Помимо каскадных генераторов для подачи высокого напряжения на электроды классификатора могут быть использованы и электростатические генераторы роторного типа, отличающиеся высокими эксплуатационными характеристиками, относительно малой массой, плавной регулировкой напряжения, высокой надежностью и длительным сроком службы.

Все съемные панели и дверцы, открывающие доступ к высоковольтным узлам классификатора, должны быть снабжены системой блокировки, обеспечивающей надежную электробезопасность обслуживающего персонала.

В процессе эксплуатации классификатора необходимо систематически следить за надежностью заземляющего контура, сопротивление которого должно быть не более 4 Ом. При наличии электрических разрядов на вводах высоковольтных кабелей, а также при резких колебаниях рабочего напряжения классификатор следует немедленно отключить от сети.

Подготовку классификатора к работе необходимо начинать с проверки надежности его заземления и только после этого подключать классификатор к сети. Классифицируемый материал засыпают в подающий бункер установки до подачи напряжения на рабочие органы классификатора. Регулирующими органами пульты управления производят настройку режимов технологического процесса, в соответствии с инструкцией включают высоковольтные источники классификатора, устанавливают рабочее напряжение на классифицирующих электродах и запускают в работу классификатор.

Во время эксплуатации оборудования обслуживающий персонал заполняет формуляр классификатора. Ремонт, чистку узлов и электрооборудования классификатора следует производить по графику планово-предупредительного ремонта, но не реже чем один раз в три месяца. Все работы по ремонту классификатора должны производиться при отключенном напряжении питания.

Для размещения классификатора на месте его эксплуатации необходима площадь не менее 10—15 м² при высоте потолков не менее 3 м. Освещенность рабочего места должна быть около 50 лк. Классификатор устанавливают на фундаменте или закрепляют на массивном основании.

Классификаторы эксплуатируются обычно в режиме, далеко от искрового пробоя, что не позволяет создать достаточно высокие напряженности электростатического поля в рабочей зоне классификатора. Для повышения экономической эффективности работы классификаторов они могут снабжаться электрозащитными устройствами, позволяющими вести электроклассификацию при повышенных градиентах электростатического поля вблизи искрового пробоя. В классификаторе могут быть применены как электронные схемы для отключения подпитки искрового промежутка, так и искропредупреждающие устройства, которые, имея чрезвычайно малое время срабатывания, разряжают паразитные емкости источников питания, кабеля и классификатора, не допуская искрения.

Активные искрогасящие устройства защищают электроклассификатор при аварийной ситуации. Однако для флюидизационно-электростатических классификаторов более подходят искропредупреждающие устройства, хотя они и обладают повышенной сложностью по сравнению с искрогасящими устройствами.

Список литературы

1. Непомнящий Е. А. Расчет показателей процесса грохочения и отсадки.—«Обогащение руд», 1963, № 6, с. 20—23 с ил.
2. Шигин Е. К., Демидов Е. Я. Автоматический анализатор дисперсности продуктов. Авт. свид. № 303561.—«Бюл. изобр.», 1971, № 16.
3. Kreller Fr. Über die feinstabsiebung von trockenen gekornen, suspensionen und zahlflussigkeiten.—«Aufbereitungs—Technik», 1968, Bd 9, Nr. 3, S. 103—110.
4. Листопад Г. Е. К вопросу о совместной работе решета и воздушного потока.—«Докл. науч. конференции Волгоградского с.-х. ин-та», 1958, т. 1, с. 87—89.
5. Никитин Ю. И., Уман С. М., Бакаленко А. Н. Воздушно-ситовой метод классификации шлифпорошков из синтетических алмазов.—«Синтетические алмазы», 1974, № 5 (35), с. 21—24 с ил.
6. Bruninhans P. Feinsiebung mit schallsiebmaschinen.—«Aufbereitungs—Technik», 1960, Bd. 1, Nr. 1, S. 53—57.
7. Вибрационный классификатор сыпучих материалов. Авт. свид. № 455754.—«Бюл. изобрет.», 1975, № 1. Авт.: В. А. Вишняков, В. А. Назаренко, Н. В. Федосеев и др.
8. Colon F. G. Sieve analyses now possible to five microns with micro-mesh sieves. Chemistry and Industry, 1965, No 6, p. 263—266 with ill.
9. Carrol H. B., Akst J. B. Sieving for particle size distribution in 10 though 1m region.—«Review Sci. Instrument», 1966, v. 37, No 5, p. 620—623, with ill.
10. Подкосов Л. Г. Механизм и некоторые закономерности процесса гидравлической классификации.—В кн.: Труды Всесоюз. совещ. Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых, М., Госгортехиздат, 1960, с. 186—194 с ил.
11. Барский М. Д., Ревнивцев В. И., Соколкин Ю. В. Гравитационная классификация зернистых материалов. М., «Недра», 1974. 232 с. с ил.
12. Fitch W. Why particles separate in sedimentation processes.—Industrial Engineering Chemistry, v. 54, No 10, 1962, p. 44—51 with ill.
13. Годэн А. М. Основы обогащения полезных ископаемых. М., Металлургиздат, 1946. 536 с. с ил.
14. Вейнберг К. Л. Оборудование стекольных заводов. М., Госстройиздат, 1961. 619 с. с ил.
15. Исследование работы классификатора абразивных материалов Саратовского завода технического стекла.—«Стекло и керамика», 1964, № 2, с. 12—15 с ил. Авт.: Н. В. Золотарев, Л. И. Высоцкий, В. Н. Калякин, Э. Б. Шабанова.
16. Петрова Т. А. Методика получения тонких абразивных материалов для изготовления полированных шлифов.—«Геология рудных месторождений», 1961, № 3, с. 104—109 с ил.
17. Авершин И. Н. Вопросы разделения в механических классификаторах.—«Обогащение руд», 1958, № 2, с. 26—21 с ил.

18. Вертешев М. С. Гидравлический классификатор со шнековым питателем.—«Химическая промышленность», 1964, № 2, с. 27—30 с ил.
19. Феофилактова Е. П. Об использовании шламов электрокорунда белого.—«Абразивы и алмазы», 1965, № 4, с. 25—27 с ил.
20. Федосеев В. А., Контуш С. М. Фракционирование порошков методом осаждения в ламинарном потоке.—«Коллоидный журнал», 1965, т. 27, № 6, с. 899—902 с ил.
21. Петруничев В. А., Королева Е. Б. Разделение порошка вольфрама на фракции с применением псевдооживленного слоя.—«Заводская лаборатория», 1967, № 2, с. 180—182 с ил.
22. Донат Е. В. Обеспыливатель для одновременной классификации полидисперсного материала на несколько фракций.—«Химическая промышленность», 1957, № 4, с. 235—237 с ил.
23. Клячин В. В. О разделении минеральных зерен в классифицирующем гидrocиклоне.—«Цветные металлы», 1963, № 3, с. 14—17.
24. Порада А. Н., Райз А. Б., Ветер В. А. Обеспыливание шлиф-материалов методом воздушной сепарации.—«Абразивы», 1973, № 12, с. 1—4 с ил.
25. Равикович В. В. Классификация тонких микропорошков в центробежном поле.—«Абразивы и алмазы», 1964, № 4, с. 12—15.
26. Сарховский Г. Д., Никитин Ю. И., Уман С. М. Центрифуга для классификации мелкозернистых материалов. Авт. свид. № 398282.—«Бюл. изобрет.», 1973, № 38.
27. Землицкий Е. Я. Новый способ дисперсионного анализа центрифугированием высокодисперсных систем и систем, взвешенных в среде с высокой вязкостью.—«Коллоидный журнал», 1961, т. 23, № 6, с. 699—705.
28. Вялухин П. Н., Дерягин Б. В. Способ классификации в потоке жидкости или газа высокодисперсных материалов, находящихся в поле действия центробежных сил. Авт. свид. № 175732.—«Бюл. изобрет.», 1965, № 20.
29. Равикович В. В., Фишер С. Г. Центрифуга ЦКМ-2 для классификации особо тонких микропорошков.—«Абразивы и алмазы», 1966, № 1, с. 11—14 с ил.
30. Beuschausen W. Feinzerkleinerung und Windsichtung.—«Chemische Technik», 1959, Jg. 11, Nr. 4, s. 190—200, Nr. 5, s. 237—240.
31. John H. Zu der verfahrenstechniken der trockensortierung.—«Aufbereitungs—Technik», 1966, Nr. 10, s. 614—623.
32. Классификатор. Авт. свид. № 455753.—«Бюл. изобрет.», 1975, № 1. Авт.: Х. Э. Вайк, В. К. Кээрд, И. А. Ридамс, Х. Х. Ууэмыйс.
33. Берсон Д. Г., Ииноя К., Опп К. Классификатор для тонких порошков.—«Приборы для научных исследований», 1963, т. 34, № 9, с. 62—65 с ил.
34. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. Изд. 3, перераб. и доп. М., «Недра», 1970. 522 с. с ил.
35. Ralston O. G. Electrostatic separation of mixed granular solide.—Amsterdam—London—New York—Elsevier», 1961, p. 262.
36. Поль Г. И., Гюнтер А. Устройство для разделения мелкозернистых материалов по величине частиц. Авт. свид. № 153599.—«Бюл. изобрет.», 1956, № 12.
37. Langer G., Radnik J. L. Development and preliminary testing for electrostatic classification of submicron airborne particles.—*Journal of Applied Phys.*, 1961, v. 32, No 5, p. 955—957 with ill.
38. Плаксин И. Н., Олофинский Н. Ф. Коронная сепарация и ее применение для обогащения, классификации и обеспыливания.—В кн.: Электрические и магнитные методы сепарации. М., 1965, с. 2—11.
39. Бабашкин В. А., Верещагин И. П., Пашин М. М. Исследование движения сферических частиц в поле коронного разряда и электрического ветра.—«Сильные электрические поля в технологических процессах (ЭИТ)», 1969, вып. 2, с. 143—175 с ил.

40. Трубчатый электроклассификатор с комбинированным электродом. Авт. свид. № 185782. — «Бюл. изобрет.», 1966, № 18. Авт.: В. И. Белов, В. К. Верховцев, Е. М. Иванов, Б. С. Кулаков.
41. Белов В. И., Иванов Е. М., Кулаков Б. С. Способ электроклассификации мелкодисперсных материалов. Авт. свид. № 185781. — «Бюл. изобрет.», 1966, № 18.
42. Олофинский Н. Ф., Новикова В. А. Трибоадгезионная сепарация. М., «Недра», 1974, 168 с. с ил.
43. Турецкий Я. М., Петухов И. М. Электроклассификация железных порошков. — «Тезисы докл. Всесоюзн. научн.-техн. совещания. Применение электронно-ионной технологии в промышленности» (октябрь 1973, Тбилиси), М., 1973, с. 47—49.
44. Петухов И. М. Новый метод классификации абразивных материалов по крупности. — «Абразивы и алмазы», 1967, № 4, с. 18—21.
45. Бут А. И. Способ электроклассификации тонкодисперсных материалов и устройство для осуществления способа. Авт. свид. № 104771. — «Бюл. изобрет.», 1963, № 6.
46. Чекаловец О. К. Способ классификации тонкоизмельченного материала. Авт. свид. № 187677. — «Бюл. изобрет.», 1966, № 21.
47. Чекаловец О. К. Электрический коронный сепаратор с сетчатыми заземленными электродами. — «Труды НИИЦЕММАШ», 1966, вып. 4, с. 73—82 с ил.
48. Верещагин И. П., Олексевич И. В., Пашин М. М. Способ классификации частиц. Авт. свид. № 202799. — «Бюл. изобрет.», 1967, № 20.
49. Токарев А. Г., Белов В. И., Лежнин Д. Н. Устройство для просеивания зернистых материалов. Авт. свид. № 211928. — «Бюл. изобрет.», 1968, № 8.
50. Установка для электроклассификации порошков. Авт. свид. № 202019. — «Бюл. изобрет.», 1967, № 19. Авт.: В. И. Белов, Д. Н. Лежнин, Р. Н. Петров и др.
51. Olofinsky N. P., Novikova V. A., Belov V. I. Application of electrical methods of separation to close sizing of finely dispersed mineral particles. — 10 International Mineral Processing Congress, London, 1973.
52. Спивак Г. В., Лукацкая Р. А. О втором предельном случае электронной оптики. — «Докл. АН СССР», 1948, LX, № 3, с. 375—378.
53. Крамаренко П. Ф. Управление движением взвешенных частиц в сильных электрических полях при атмосферном давлении. — «Известия вузов. Физика», 1960, № 1, с. 47—51 с ил.
54. О новой методике нанесения люминесцентных покрытий для экранов кинескопов цветного телевидения. — «Электронная техника», 1967, вып. 3, с. 57—62 с ил. Авт.: А. П. Андросов, А. В. Богомолов, Т. Н. Васильева и др.
55. Штепа Н. И. О фокусировке мелких частиц электростатическими осесимметричными полями. — «Журнал технической физики», 1966, т. 36, вып. 8, с. 470—481 с ил.
56. Штепа Н. И. О фокусировке мелких частиц плоскими электростатическими полями. — «Журнал технической физики», 1968, т. 38, № 6, с. 1060—1066 с ил.
57. Бакуль В. Н. К вопросу создания международного стандарта на зернистость алмазных порошков. — «Синтетические алмазы», 1974, № 2, с. 13—19.
58. Мойжес Б. Я. Электростатическое поле проволочной сетки с квадратными ячейками. — «Журнал технической физики», 1957, т. 27, вып. 1, с. 147—155 с ил.
59. Кельман Д. М., Явор С. Я. Электронная оптика. Изд. 2, доп. М., «Наука», 1968. 176 с. с ил.
60. Страшкевич А. М. Электронная оптика электростатических полей. М.—Л., «Энергия», 1956. 327 с. с ил.
61. Леонов В. А., Лежнин Д. Н. Разработка способа зарядки твердых частиц аэрозолями электрически распыляемой жидкости. — В кн.: Труды III научно-технической конференции. Вильнюс, 1972, с. 289—298.

62. Леонов В. А., Белов В. И., Лежнин Д. Н. Способ зарядки частиц аэрозоля. Авт. свид. № 324784. — «Бюл. изобрет.», 1972, № 2.
63. Леб А. Статическая электризация. Изд-во иностр. лит., М., 1962. 408 с. с ил.
64. Гуревич А. А., Леонов В. А. К вопросу о трибозарядании микропорошков. — «Атмосферное электричество», 1965, вып. 177, с. 81—89.
65. Алейникова И. Н., Китаев А. В., Филипенко Б. П. О зарядании порошков диэлектриков в контакте с металлом. — «Коллоидный журнал», 1966, т. 28, № 5, с. 625—630.
66. Пашин М. М. Заряд проводящего эллипсоида в электрическом поле с объемным зарядом. — «Труды МЭИ», 1965, вып. 64, с. 233—244.
67. Мирзабекян Г. З. Некоторые вопросы теории зарядки аэрозолей в поле коронного разряда. — Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1966 (МЭИ).
68. Палкин Л. И. Об оценке заряда, приобретаемого частицей в поле коронного разряда. — «Изв. вузов. Энергетика», 1967, № 5, с. 54—58.
69. Основы электродинамики дисперсных систем. М., «Энергия», 1974. 478 с. с ил. Авт.: И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин.
70. Лебедев Н. Н., Скальская И. П. Сила, действующая на проводящий шарик, помещенный в поле плоского конденсатора. — «Журнал технической физики», 1962, т. 32, вып. 3, с. 375—378.
71. Леонов В. А., Лежнин Д. Н., Белов В. И. Максимальный заряд частиц при контактном способе зарядания. — «Электронная техника», 1971, сер. 10, вып. 6 (46), с. 3—13.
72. Попков В. И. Биполярное зарядание волокон на плоских электродах. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1968, т. 1, с. 56—65.
73. Коряков В. И., Савочкина Т. М. Контактное зарядание порошков на сетчатых электродах. — «Электронная техника», 1969, сер. 10, вып. 4 (29), с. 17—29.
74. Методы расчета электрических полей. М., «Высшая школа», 1963. 414 с. с ил. Авт.: Н. Н. Миролюбов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, И. Н. Тиходеев.
75. Богородицкий И. П., Пасынков В. В. Материалы в радиоэлектронике. М., Госэнергоиздат, 1961. 352 с. с ил.
76. Баулин В. Л. Исследование процесса испарения заряженной капли, движущейся в воздухе. — «Сильные электрические поля в технологических процессах (ЭИТ)», 1971, вып. 2, с. 289—295.
77. Способ очистки газов. Авт. свид. № 247241. — «Бюл. изобрет.», 1969, № 22. Авт.: В. И. Белов, Д. Н. Лежнин, В. А. Леонов, В. Н. Корнеев.
78. Шонка Ф. Р., Файла Дж., Роуз В. Е. Новый высокочувствительный электрометр. — «Приборы для научных исследований», 1964, т. 35, № 8, с. 1046—1049.
79. Алиев Т. М. Динамический электрометр с малой входной емкостью. — «Изв. вузов. Приборостроение», 1966, т. 9, № 1, с. 29—35.
80. Ткачев В. В. Прибор для измерения зарядов статического электричества на отдельной нити. — «Текстильная промышленность», 1965, № 6, с. 71—75.
81. Красногорская Б. Н., Седунов С. А. Индукционный метод измерения зарядов отдельных частиц. — «Изв. АН СССР», 1961, № 5, с. 775—777.
82. Губенский В. А. Экспериментальное исследование процесса электроокраски. — «Лакокрасочные материалы и их применение», 1966, № 1, с. 26—33.
83. Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. М., «Металлургиздат», 1959. 437 с. с ил.
84. Jillespie T., Langstroth G. O. An instrument for determining the electric charge distribution in aerosols. — «Canadian Journal Chem», 1952, v. 30, No 12, p. 1056—1068.

85. Жусь Г. В. Прибор для определения диэлектрических проницаемостей малых проб порошков. — В кн.: Машины и приборы для испытания и исследования материалов. М., 1967, с. 18—21.

86. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955. 216 с. с ил.

87. Макальский Л. М., Мирзабеян Г. З. Экспериментальное исследование зарядки частиц размером 0,2—4 мкм ионами воздуха. — «Сильные электрические поля в технологических процессах (ЭИТ)», 1971, вып. 2, с. 95—108.

88. Балабанов Е. М. Зарядка частиц в поле коронного разряда при большой запыленности газа. — «Электричество», 1965, № 2, с. 57—62.

89. Коряков В. И., Леонов В. А., Лежнин Д. Н. Заряд и динамика поведения проводящей частицы в электрическом поле плоского конденсатора. — «Электронная техника», 1967, сер. 10, вып. 3, с. 12—22.

90. Белов В. И., Леонов В. А., Лежнин Д. Г. Получение сферических частиц. — «Электронная техника», 1969, сер. 10, вып. 3, с. 46—49.

91. Таганов И. Н. Распределение частиц по скоростям в монодисперсном псевдоожигенном слое. — «Теоретические основы химической технологии», 1967, т. 1, № 5, с. 662—666.

92. Ciborovski J., Wiodorski A. Badania zjawisk elektryzacji statycznej wystepujacych w zlozu fluidalnym. — «Chemia stosowana», 1962, t. 6, N 4, s. 541—554.

93. Ганжа В. Л., Забродский С. С., Малюкович С. А. Влияние температурного фактора на электризацию в псевдоожигенном слое. — «Докл. АН БССР», 1968, т. 12, № 2, с. 123—125.

94. Климович А. Ф. Создание и исследование электростатического способа получения полимерных покрытий. Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Рига, 1971 (Ин-т механики полимеров АН ЛатвССР).

95. Некоторые пути увеличения заряда частиц в кипящем слое. — «Сильные электрические поля в технологических процессах (ЭИТ)», 1971, вып. 2, с. 132—143. Авт.: В. И. Белов, Д. Н. Лежнин, В. А. Леонов, Н. Ф. Олофинский.

96. Карта Г., Дель Фа К., Чикку Р. Электрическая сепарация тонкоизмельченных руд во взвешенном состоянии в газовой среде с зарядкой частиц ионизацией или трением. — В кн.: VIII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Л., 1968, с.

97. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. — М., «Химия», 1967. 424 с. с ил.

98. Гальперин Н. И., Айкштейн В. Г., Гойхман И. Д. О пределах существования псевдоожигенного слоя. — «Инженерно-физический журнал», 1964, т. 7, № 7, с. 15—19.

99. Усович Ю. А., Шустов В. П. Аппарат для нанесения полимерных покрытий. Авт. свид. № 423684 — «Бюл. изобрет.», 1974, № 14.

100. Аппарат для проведения процессов во взвешенном слое. Авт. свид. № 456630. — «Бюл. изобрет.», 1975, № 15. Авт.: В. С. Романов, В. Я. Лебедев, В. В. Вялков, М. И. Кручинин.

101. Лавров И. В. Приготовление препаратов водных суспензий тонких абразивных микропорошков для электронно-микроскопического исследования. — «Абразивы и алмазы», 1965, № 1, с. 29—33.

102. Материалы абразивные в зерне. Классификация по крупности, нормы зернового состава и методы испытаний. ГОСТ 3647—71, М., изд-во стандартов, 1973.

103. Порошки алмазные. ГОСТ 9206—70, М., Изд-во стандартов, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. Теоретические основы флюидизационно-электростатической классификации	9
1. Расчет фокусирующего эффекта сетчатых электродов	9
2. Исследование фокусирующих свойств сетчатых электродов методом моделирования	16
Глава II. Основные процессы флюидизационно-электростатической классификации	20
1. Заряжание частиц классифицируемых материалов	20
2. Измерение интегральных и дифференциальных зарядов частиц микропорошков	27
3. Флюидизация тонкодисперсных материалов	75
Глава III. Флюидизационно-электростатическая классификация тонкодисперсных материалов	86
1. Конструкция классификаторов	86
2. Классификация тонкодисперсных материалов и контроль процесса	94
3. Применение флюидизационно-электростатической классификации для обработки алмазов, абразивов люминофоров, черновых концентратов и других материалов	109
4. Обслуживание классификаторов и техника безопасности	113
Список литературы	115

ИБ № 1661

Владилен Иванович Белов

ФЛЮИДИЗАЦИОННО-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор издательства *Н. Д. Балашова*
Обложка художника *Б. К. Силаева*
Технические редакторы *О. Н. Ласточкина, Л. Я. Голова*
Корректор *А. Г. Кудрявцева*

Сдано в набор 19/XI 1976 г. Подписано в печать 29/III 1977 г. Т-06049. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага № 2. Печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 8,43. Тираж 760 экз. Заказ 2540/5403-11. Цена 1 р. 26 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

2148

1 р. 26 к.

НЕДРА