

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. К. АБРАМЯН, Л. Е. КРАШВИН

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВКЕ САХАРНОЙ ПУДРЫ

При пневмотранспортировке сыпучих материалов действуют следующие основные механизмы заряжения частиц: симметричное заряжение и контактное заряжение. К этим основным механизмам заряжения можно добавить некоторые второстепенные механизмы: заряжение частиц вследствие ударов при движении в турбулентном потоке [1, 2]; заряжение частиц вследствие адсорбции других более мелких заряженных частиц поверхностью крупных [3, 4]; электризация частиц путем захвата из окружающей газовой среды ионов определенного знака вследствие избирательной их адсорбции [5, 6]. Рассмотрим последовательно вопросы, связанные с основными механизмами заряжения, применительно к транспортировке сахарной пудры.

Симметричное заряжение. Исходной предпосылкой является предположение, что электризация транспортируемого материала отчасти вызывается разделением крупных частиц на более мелкие. Турбулентное движение частиц в газовой среде сопровождается ударами, которые являются причиной раздробления крупных частиц. Слипшиеся частицы могут быть разделены под воздействием инерционных сил. Разрушение частиц существенно зависит от их скорости, влажности и формы.

При пневмотранспортировке сахарной пудры происходит сильное размельчение материала еще в эжекторном питателе. Возникает необходимость исследования симметричного заряжения именно в эжекторе. Из самой природы вещества вытекает возможность микроскопического разделения ионов. При температурах, отличных от абсолютного нуля, правильность строения кристалла вещества нарушается и притом в тем большей степени, чем выше температура. Следовательно, существует неравномерное распределение электрических зарядов по объему кристалла, соответствующее определенной структуре решетки кристалла. При раздроблении частицы происходит макроскопическое разделение зарядов. Количественное решение этой задачи дано в [7, 8]:

$$\bar{n} = z(S)^{-1}, \quad (1)$$

где \bar{n} — средний заряд частицы; S — ее поверхность; α — постоянная, характеризующая материал.

Для частиц, имеющих сферическую форму, $\bar{n} = \beta d$, где d — диаметр частицы.

Нам была сделана экспериментальная проверка этого закона при размельчении сахарной пудры в эжекторном питателе. Метод исследования основан на изучении движения заряженных частиц, перемещающихся под действием двух сил: силы тяжести и силы со стороны горизонтального электрического поля. Исходя из того, что движение заряженных аэрозольных частиц в электрическом поле принципиально не отличается от движения в поле тяготения, можно выразить диаметр частицы следующим образом:

$$d = \left[\frac{18 \tau V_v}{(\rho_1 - \rho_2) g} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где V_v — вертикальная составляющая скорости; ρ_1 и ρ_2 — плотности частицы и газа; τ — вязкость газа; g — ускорение свободного падения.

Заряд частицы определится как

$$q = \frac{3 \pi \tau V_h}{E}, \quad (3)$$

где V_h — горизонтальная составляющая скорости;

E — напряженность электрического поля.

По микрофотографии стеклянной пластинки с осевшими частицами определяли «диаметр» исследуемой частицы и ее смещение x в горизонтальном направлении. Принимая, что оседающая частица движется равномерно, и располагая значениями E , τ , ρ_1 , d и x , можно написать:

$$q = k x d^3, \quad (4)$$

где k — постоянная прибора (включая и напряжение на конденсаторе); x и d в сантиметрах; q — заряд в кулонах.

В нашем эксперименте $k = 7,7 \cdot 10^{-8} \left| \frac{\text{а. сек}}{\text{см}^2} \right|$.

При изучении симметричного заряжения нужно иметь в виду, что вследствие контакта сахарной пудры с металлической поверхностью, последняя заряжается отрицательно. Это доказано нами экспериментально. Значит, образование отрицательно заряженных частиц обусловлено только измельчением, тогда как образование положительно заряженных частиц вызывается как измельчением, так и контактными явлениями на металлической поверхности. Поэтому для исследования симметричного заряжения следует учитывать только отрицательно заряженные частицы.

Схема установки для исследования симметричного заряжения показана на рис. 1. Здесь учтены возможность образования конвек-

ционных токов и опасность возникновения короны. Были проведены предварительные опыты с целью определения основных параметров ширины и выбора ширины щели. В результате были найдены следующие удобные значения: напряженность между плоскими обкладками конденсатора $E = 246$ в.с.м.; расстояние между ними $d = 3,25$ с.м.; путь частиц по вертикали. $y = 4,275$ с.м.

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условный диаметр шарообразной частицы (мм)	Средний заряд отрицательно заряженных частиц $q \cdot 10^{14}$ (кулон)
43—60	2,3209
60—80	5,3147
80—100	29,2207
100—120	66,6424
120—145	110,2534
145—180	126,9562
180—200	206,7126
200—220	254,4804
220—240	339,6289
240—260	413,028
260—280	482,2944
270—300	602,3556
300—330	696,7345

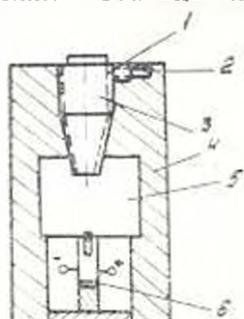


Рис. 1. Схема установки для исследования симметричного заряжения: 1 — изоляционный слой; 2 — трубопровод; 3 — шпалон; 4 — теплоизоляционный слой; 5 — емкость; 6 — стеклянная пластинка.

Здесь не учтены частицы, смещение которых оказалось менее, чем $1,5$ мк, так как оно соизмеримо с погрешностью опыта. Из приведенных данных следует, что увеличение заряда частиц по мере увеличения их диаметра происходит значительно быстрее, чем можно было бы ожидать, исходя из заключения Куинкеля и Вайсмана. Это объясняется тем, что исследовались несферические частицы, обладающие сильно развитой поверхностью, причем по мере уменьшения размеров частицы ее удельная поверхность растет гораздо быстрее, чем это следовало бы для правильной сферы. Найдено, что приобретаемый частицей заряд в зависимости от ее диаметра приблизительно описывается уравнением

$$q = Ad^2 \quad (5)$$

Контактное заряжение. При соприкосновении полупроводника с металлом должны выравниваться их электрохимические потенциалы, что совершается за счет перехода электронов или ионов на контактную поверхность одного из тел. Если этот, имеющийся на обоих телах, избыток зарядов сохраняется затем хотя бы частично, то имеет место контактное заряжение. В зоне контакта возникает двойной электрический слой. Так как толщина слоя существенно превосходит длину свободного пути электрона, то этот слой обладает чрезвычайно высоким сопротивлением, а напряженность поля в нем достигает значений $10^5 - 10^7$ в.м. Во время разделения контактирующих

тел как вследствие поверхностной электропроводности, так и за счет возникновения газового разряда может появиться обратный ток. Поэтому

$$I = I_{\text{пр.}} - I_{\text{об.}} \quad (6)$$

Таким образом, для существования заметного тока зарядки требуется, чтобы $I_{\text{пр.}} \gg I_{\text{об.}}$, т. е. чтобы по крайней мере одна из контактирующих поверхностей обладала малой электропроводностью.

Большое влияние на значение работы выхода электрона оказывает мономолекулярный слой воды и газов, способствующий образованию двойного электрического слоя на поверхностях контакта. Значит, еще до соприкосновения на контактирующих телах существует двойной электрический слой. Выясним влияние этого слоя на величину работы выхода электрона. Пусть две весьма близкие и параллельные друг другу поверхности несут заряды противоположных знаков, а плотности зарядов \pm и \pm' на противоположащих элементах обеих поверхностей равны по абсолютной величине ($\pm = \pm'$).

Если $\pm = \pm l$ постоянна по всей толщине l зазора, то $\varphi = \pm \Omega$, где Ω — телесный угол, под которым виден элемент поперечного сечения зазора в двойном слое из точки P . Потенциал всякого (как замкнутого, так и незамкнутого) двойного слоя испытывает на его поверхности скачок $4\pi\pm$. Если слой расположен на поверхности сферической частицы, то он, как всякая замкнутая поверхность, виден под углом 4π из всех точек, лежащих внутри сферы и под углом 0 из внешних точек. Стало быть, потенциал замкнутого двойного слоя равен нулю во всем внешнем пространстве, но составляет $\pm 4\pi\pm$ во всех точках, охватываемых слоем. Знак потенциала зависит от того, какая сторона слоя обращена внутрь сферы. В результате получаем:

$$\varphi = \varphi_0 \pm 4\pi\pm. \quad (7)$$

Общий заряд насыщения (без учета обратных токов утечек) составляет [9]:

$$q_s = \pm A_s \approx V \sqrt{2} \frac{(16 E_n r^2)^{1/2}}{\rho} (mg)^{1/2} \pm. \quad (8)$$

где A_s — общая поверхность шарообразного образца, подверженная молекулярному контакту; E_n — эффективный модуль Юнга, равный

$$E_n = \frac{1}{E_{\text{д. пол.}}} + \frac{1}{E_{\text{п. металл}}};$$

P — давление; r — радиус частицы; mg — ее вес:

$\pm = \frac{e_0 U_s}{4\pi b}$ — поверхностная плотность зарядов, которая обусловлена разностью работ выходов.

Согласно [10], ток образца, катящегося по поверхности с заданной скоростью (с учетом обратного тока проводимости), описывается следующим уравнением:

$$\frac{dq}{dt} = c(q_0 - q) - \xi \cdot q. \quad (9)$$

Здесь c — постоянная, по данным для некоторых высокомолекулярных соединений, равная 0,25; ξ — коэффициент, характеризующий утечки и прямо пропорциональный электропроводности частицы.

Естественно, что для возникновения заряжения частицы должно иметь место соотношение: $\xi < c$.

Поверхностная плотность зарядов уменьшается также в результате газового разряда, ток которого можно представить как

$$i_p = 4\pi r q + \tau v_1 (U - U_0), \quad (10)$$

где i — проводимость воздуха; v_1 — скорость передвижения ионов в газе; U_0 — начальное напряжение короны; U — потенциал частицы; τ — коэффициент, который зависит от формы тела, влажности и запыленности газа, поверхностной проводимости.

При принятых в пневмотранспорте скоростях можно считать, что $v_1 = KE$, где K — подвижность ионов, а $E = \frac{q}{r^2}$. Тогда уравнение (9) видоизменяется:

$$\frac{dq}{dt} = c(q_0 - q) - \xi q - 4\pi r q - \tau K \frac{q}{r^2} \left(\frac{q}{r} - U_0 \right). \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает упрощенную картину электризации сферических частиц. Действительный процесс электризации, как, например, электризация транспортируемого газом материала в системе пневмотранспорта гораздо сложнее. Поэтому экспериментальное исследование и выявление закономерностей в электризации сыпучих материалов при пневмотранспортировке представляет определенную ценность.

В лабораторных условиях были получены зависимости токов с различных участков системы пневмотранспорта: от концентрации материала в газе, от скорости потока (рис. 2), а также зависимости тока эжекторного питателя от относительной влажности воздуха, влагосодержания материала (рис. 3) и от его дисперсного состава (рис. 4). Графики этих зависимостей позволяют заключить, что в процессах заряжения и передачи зарядов большую роль играет пограничный диэлектрический слой между металлической поверхностью и газовым потоком. Если в эжекторном питателе, где из-за большой скорости образование пограничного слоя затруднено, сохраняется прямая пропорциональность между током и скоростью, то этого нельзя сказать об остальных участках системы пневмотранспорта. Рассмотрим явления в этих участках:

Горизонтальный участок трубопровода. При малых скоростях здесь легко образуется стационарный пограничный слой и происходит только передача стенкам зарядов, полученных вследствие контактных явлений в эжекторном питателе. При увеличении скорости начинает-

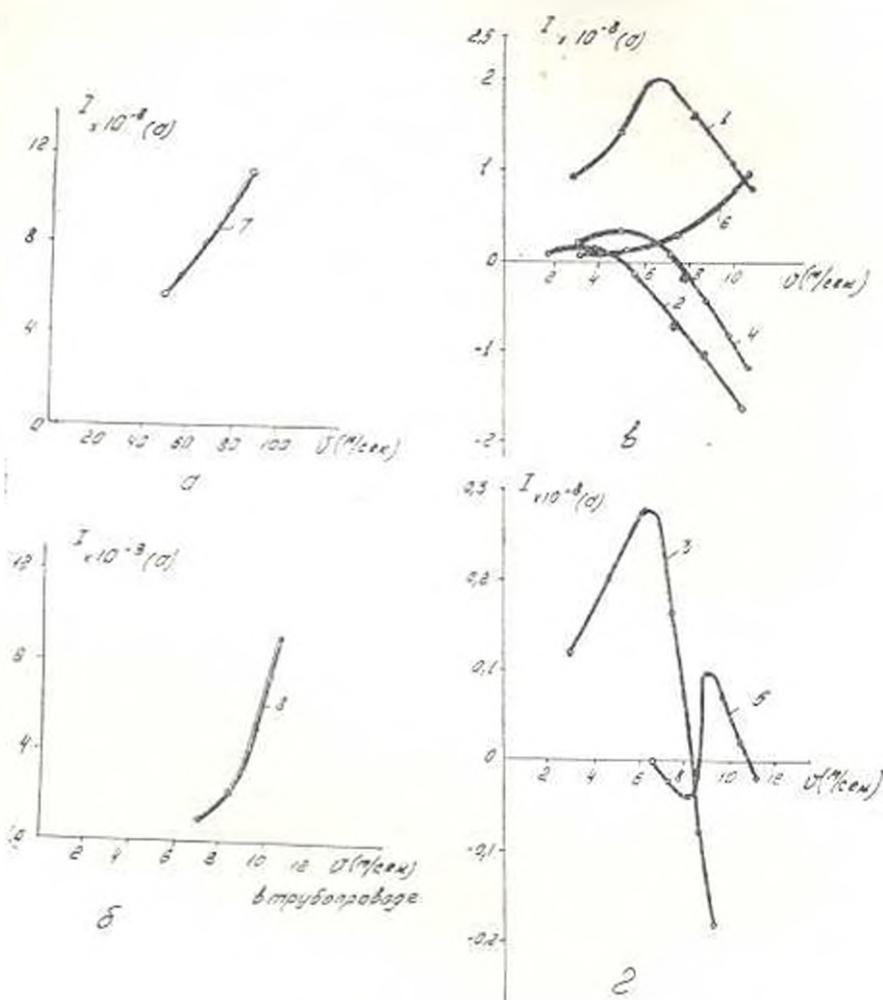


Рис. 2. Зависимость тока системы от скорости потока: 1—горизонтальный участок трубопровода $K = 0,00365$ кг/сек; 2—то же $K = 0,0008$ кг/сек; 3—уголок $K = 0,0008$ кг/сек; 4—то же $K = 0,00254$ кг/сек; 5—вертикальный участок трубопровода $K = 0,0008$ кг/сек; 6—то же $K = 0,00365$ кг/сек; 7—ток от эжекторного питателя при $K = 0,00254$ кг/сек; 8—ток от циклона при $K = 0,00365$ кг/сек.

ся частичный отрыв этого слоя, ток становится неустойчивым и при дальнейшем увеличении скорость изменяет направление: контактное заряджение начинает преобладать над передачей заряда. Такого же рода зависимость наблюдается и при изменении концентрации. При малых концентрациях ток от горизонтального участка отрицателен. По мере увеличения концентрации создаются благоприятные условия для образования стационарного пограничного слоя и для преобладания передачи зарядов. С дальнейшим увеличением концентрации ток достигает «насыщения», которое можно объяснить тем, что при увеличении концентрации ток с эжекторного питателя тоже стремится к

насыщению и вследствие увеличения толщины пограничного слоя ухудшается передача зарядов.

Участок поворота трубопровода в вертикальной плоскости. Здесь колебания тока выражены сильнее, чем на горизонтальном участке. При малых концентрациях с увеличением скорости наблю-

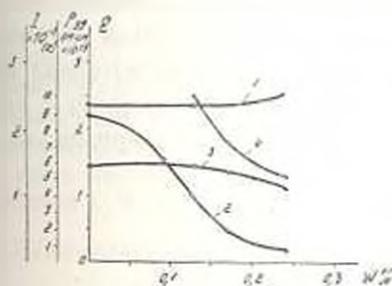


Рис. 3. Зависимость тока системы от влажности воздуха и влагосодержания материала: 1—диэлектрическая постоянная; 2—удельное сопротивление; 3, 4—ток эжекторного питания.

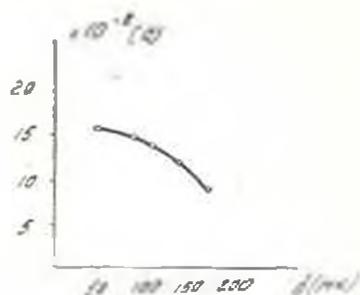


Рис. 4. Зависимость тока эжекторного питания от дисперсного состава порошка.

дается картина, аналогичная описанной для горизонтального участка трубопровода. При больших скоростях и с увеличением концентрации увеличивается отрицательный ток. Это явление можно объяснить тем, что поворот потока воздуха усиливает его турбулизацию; при этом снижается стабильность пограничного слоя и создаются благоприятные условия для контактного заряжения. При малых скоростях происходит образование пограничного слоя, вследствие чего передача заряда преобладает над контактным заряжением.

Вертикальный участок трубопровода. При малых скоростях здесь наблюдается положительный ток. Это свидетельствует о преобладании передачи зарядов. Интересный характер имеет зависимость тока от скорости при подаче материала со скоростью $0,0008 \text{ кг/сек}$. Здесь ток весьма неустойчив. Среднее значение тока во времени, отрицательное при малых значениях скорости, с ее увеличением становится положительным, а далее — вновь уменьшается и снова становится отрицательным. Такой, на первый взгляд, неожиданный ход этой зависимости находит простое объяснение, если учесть, что при малых скоростях газа (порядка скорости питания частиц) на вертикальном участке происходит понижение концентрации за счет частичного осаждения материала на стенках участка поворота. Понижение концентрации в свою очередь приводит к уменьшению пограничного слоя, и ток становится отрицательным. Дальнейшее увеличение скорости вызывает повышение концентрации и формирование пограничного слоя: ток становится положительным и нарастает. При значительном повышении скорости начинается разрушение слоя за счет срыва, что приводит к уменьшению тока. Зависимость тока от скорости при больших концентрациях имеет монотонно возрастающий

характер. при этом ток положительный. Следовательно, существует стационарный пограничный слой. При малых скоростях нарастание тока происходит медленно, но затем с дальнейшим увеличением скорости резко убыстряется. Это явление можно объяснить образованием слоя различной толщины.

В опытах при различной относительной влажности транспортирующего воздуха замечено, что этот фактор практически не оказывает влияния на ток, если подаваемый через питатель материал имеет определенное влагосодержание, а длительность его контакта с воздухом непродолжительна, так что влагосодержание материала не успевает существенно измениться.

Ленинградский технологический институт
им. Менделеева

Поступило 19.VII.1966.

Վ Վ ԱՐԵՎԵՐԻՑՅԱՆ, Լ. Ե. ԿՐԱՍՆՈՎԻՆ

ՇԱՐՔԻ ՓՈՇՈՒ ՊՆԵՎՄԱՏՅՈՒ ՓՈՆԱԿՐՈՒԹՅԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱՆ ՄՍՏՏԻՈՒ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՆՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՋՈՑՄԱՆ ՄԻ ՔՈՆԵ ՈՐԿՆԱԶՈՒԹՅՈՒՆՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա ո Վ ո Վ ո Վ ո Վ ո Վ

Հուզմանս գիտվում են շարքի փոշու պենետատիկ փոխադրման ժամանակ ստատիկ էլեկտրականության առաջացման պրոցեսները: Տեսականորեն և էքսպերիմենտալ եղանակով հետազոտված են.

ա) Միմետրիկ լիցքավորումը.

բ) Փախադրույ նշույթի մասնիկների կոնտակտային լիցքավորումը:

Միմետրիկ լիցքավորման քննարկումը հիմնավորվում է փարձեական տվյալներով, մասնավորապես՝ էքսպերիմենտալ եղանակով բացահայտված է մասնիկների լիցքի կախումը նրանց պայմանական տրամագծից.

Տեսականորեն հետազոտված է կոնտակտային լիցքավորման տարրական մեխանիզմը: էքսպերիմենտալ եղանակով ստացված են փոխադրույ նշույթի դիէլեկտրիկ թափանցելիության, տեսակարար դիմադրություն և լիցքավորման լիցքաթափման հոսանքի մեծության կախումները նրա խոնավապարտանակությունից: նշված է փոշին շորաղնեխա առաջացուց եռակալման օպդեցույթունը նրա էլեկտրական հատկությունների վրա.

Մտադրված են սխեմների տարբեր մասերում հոսանքի մեծության փորձարարական կախումները փոխադրույ նշույթի կոնցենտրացիայից և օդի հոսանքի արագությանից: նկատված է, որ լիցքավորման հիմնական աղբյուրն է էլեկտրադին սնիչը: Խոշորակուս և ցիկլոնում նշույթի մեծ կոնցենտրացիայի դեպքում առաջանում է լիցքափոխանցում՝ նշույթից պատերին: Իսկ փոքր կոնցենտրացիաների կամ մեծ արագությունների դեպքում էլեկտրականացում է դիտվում նաև խոզովակաշարում, որը պայմանավորված է խոզովակաշարի պատի հետ կոնտակտի մեջ զտնվույ նշույթի ստմանաշեխտի պրկումով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Boning P.*, Elektrotechn. Z. 73, № 20, 1952.
2. *Имаштов И. Н.* ДАН СССР, т. 121, № 1, 1958.
3. *Дроздов Н. Г.* Статическое электричество в промышленности. М.—Л., 1949.
4. *Блабачков Е. М.* Исследование дисперсных систем в электрическом поле коронного разряда. Диссертация, М., 1965.
5. *Френкель Я. Н.* Теория явления атмосферного электричества. М., 1949.
6. *Boning P.*, Z. angew. Phys. 8, 516, 1955.
7. *Kunkel W. B.* J. Appl. Phys. 19, 1056, 1948.
8. *Kunkel W. B.* J. Appl. Phys. 19, 1053, 1948.
9. *Веракин В. Н.* Исследование статического электричества при пневмотранспортировке пластмасс. Диссертация, М., 1966.
10. *Peterson I. W.* J. Appl. Phys. 25, 907, 1954.