

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА ТВЕРДОФАЗНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ НАНЕСЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова, А.А. Жирнов

Изучены методы определения потенциала поверхности, возникающего за счет осаждения твердофазных заряженных частиц аэрозоля в электрическом поле, созданном коронирующим электродом распылителя и заземленной деталью, на которую осуществляется распыление. Экспериментально исследован заряд частиц при электростатическом нанесении различных порошков на поверхности различных материалов. Особый интерес представляет определение знака заряда аэрозольных частиц исследуемых порошков, который они приобретают при воздействии электрического поля.

Ключевые слова: коронный разряд, ударная зарядка, электрораспылитель, разность потенциалов, аэрозольные частицы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно изучаются процессы зарядки микрочастиц в поле коронного разряда, в высокочастотном (ВЧ) разряде, термической плазме и т.д. [1–3]. Измерение заряда пылевых частиц в плазме с двухтемпературным распределением электронов по энергии исследована в работе [4], в которой показано, что заряд таких частиц может достигать до 10^6 зарядов электрона. Модель движения и пространственного распределения газовой взвеси при ее распылении в электрическом поле описана в работе [4], в которой модель движения газовой взвеси при распылении определяется уравнениями сохранения массы и сохранения импульса с учетом действия силы Кулона. По данным Думанского, Мельдау и Джибса аэрозольные частицы могут заряжаться в электрическом поле либо положительно (например, апатит, крахмал, песок, уголь, сера), либо отрицательно (например, кальций, мука, цинк, окись железа) в зависимости от конкретного вида вещества. Величина заряда некоторых пылей в зоне коронного разряда может достигать порядка 10^{-14} Кл [1].

В настоящей работе рассмотрено формирование ионизированного потока под действием коронного разряда и определяется величина электростатического заряда частиц.

Знание величины заряда частиц необходимо для решения ряда важных задач, например, для определения пределов допустимых концентрационных пределов накопления заряда для обеспечения безопасности в рабочих помещениях при нанесении краски на изделия и прочих работах, выполняемых с

помощью электрораспылителя. Электростатическое распыление позволяет значительно уменьшить расход исходного материала для покрытия поверхности, в отличие от других способов нанесения на покрытия, что существенно снижает риск загрязнения окружающей рабочей среды вредных аэрозольных образований. К тому же, такой способ позволяет получать тонкий слой заряженных частиц на поверхности изделий сложной формы и образовывать покрытия с новыми свойствами.

Поскольку каждое вещество имеет определенную плотность, дисперсность, скорость и электрические параметры, заряд, который может сообщаться конкретной частице, может принимать различные значения. Зная характерную величину заряда частиц вещества при электростатическом распылении с учетом поверхности, на которую она впоследствии осаждается, можно прогнозировать временные и пространственные параметры движения такой частицы, силу взаимодействия с другими веществами, что является важным для разработки физико-математических моделей электростатического воздействия на взвешенные и осажденные частицы продуцируемого аэрозоля.

Особый интерес вызывает способность накапливать заряд частицами порошков сорбентов, используемых для нейтрализации вредных веществ, поскольку заряженность таких частиц позволяет добиться увеличения эффективности очистки. К ряду таких нейтрализующих веществ можно отнести: молибдено- и вольфрамоорганические производные (гидролиз с эфиром фосфорной кислоты), объединение фосфоорганических составов с ионом

лантана либо с переходным металлом, гидрозоль или окисление с помощью отбеливателя или щелочных солей, соединения феррата (VI), окиси молибдена (VI), марганец (VII), нанотубулярный титан, наноразмерный оксид магния, алюминия, цеолиты, кремнистые образования, алюмосиликатные сорбенты. Большинство этих соединений воздействует на широкий диапазон химических отравляющих веществ (зарин, зоман, горчичный газ, сернокислый кальций, органофосфаты, этанола и др.) [6]. Для нейтрализации опасных веществ с помощью порошковых сорбентов используют нанопорошки, величина заряда частиц, полученная ими в поле коронного разряда, до сих пор не была исследована.

Таким образом, целью данной работы является определение величины заряда при электростатическом распылении веществ на подложки различных материалов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Процесс нанесения порошковых мелкодисперсных материалов в электрическом поле заключается в зарядке частиц порошка, переносе их потоками воздуха к напыляемой поверхности, осаждении частиц под действием электрического поля на поверхность.

Зарядку частиц порошкового материала в установках для напыления осуществляют путем ионной зарядки – осаждением ионов из объема газа в поле коронного разряда. В общем случае электрический разряд – это процесс образования под действием приложенного поля такого состояния в ограниченной области газа, при котором в этой области в результате многих процессов, включая ионизацию молекул, резко возрастает количество заряженных частиц (электронов и ионов) и возникает хорошо проводящий канал.

Характер процессов, ведущих к разряду, их интенсивность, форма разряда зависят, в первую очередь, от конфигурации электрического поля и распределения в нем напряженности поля:

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}, \quad (1)$$

где φ – потенциал образованного электрического поля вдоль экспериментальной оси x .

При условии, что поле между распылителем и экспериментальной поверхностью однородно, выражение (1) для напряженности поля примет вид:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (2)$$

где U – напряжение, приложенное к заряженной газозвеси; d – расстояние от оси распылителя до экспериментальной поверхности.

Величина заряда частиц, приобретаемого в поле коронного разряда, определяется предельным зарядом и степенью недозарядки [3]:

$$q = q_m \xi \quad (3)$$

где q_m – предельный заряд; $\xi = \frac{Jt}{4\varepsilon_0 E + Jt}$ –

степень недозарядки из-за ограниченного времени зарядки; $J = en_0 kE$ – плотность тока; e – значение заряда электрона;

$n_0 = 2,687 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{см}^3}$ – плотность воздуха

(число Лошмидта) при давлении $p_0 = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ и температуре $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ К}$;

$k = 2,1; 2,24 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ – подвижность положительных и отрицательных ионов соответственно;

ε_0 – диэлектрическая постоянная; t – время зарядки частиц.

Размер частиц порошков, рассматриваемых в данной работе, соответствует условию $2a \gg 1 \text{ мкм}$ (a – средний радиус частицы исследуемого вещества), следовательно, преобладает «ударный» механизм зарядки частиц. Схема ударной зарядки сферической частицы представлена на рисунке 1. При таком способе зарядки для проводящей частицы её максимальный заряд определяется выражением [3]:

$$q_m = 12\pi\varepsilon_0 a^2 E.$$

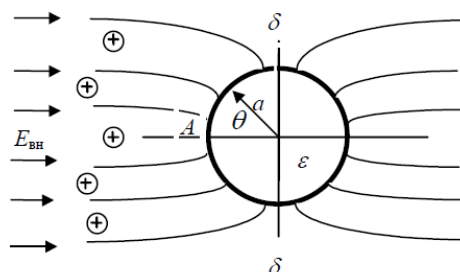


Рисунок 1 – Схема ударной зарядки сферической частицы

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 2 приведена схема расчетной области и показано расположение элементов установки [5, 6]. Распыление аэрозоля происходит через канал с сечением CC' . На оси симметрии x расположен коронирующий

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА ТВЕРДОФАЗНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ НАНЕСЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

щий электрод (электрораспылитель), к которому подводится потенциал ϕ_1 . Поперек потока располагается подложка ВВ', на которую в процессе распространения аэрозоля осажается твердая фаза с потенциалом ϕ_2 , измеряемым вольтметром. Во внешней области коронного разряда, занимающей основную часть межэлектродного пространства, движутся заряженные ионы. Изначально ключ в цепи 1 замкнут, для того, чтобы подложке сообщался нулевой заряд с земли; после образования на подложке слоя заряженных частиц определенного материала ключ в цепи 1 размыкают. Время распыления для всех веществ составляло 10 секунд. Расстояние между электрораспылителем «Старт-50» [4] и подложкой $O'A = 0,2$ м.

После проведения измерений разности потенциалов экспериментальную подложку с осажденными частицами взвешивают на электронных весах ВМК 153 с дискретностью 0,001 г, вычисляя общую массу осевших на поверхность частиц.

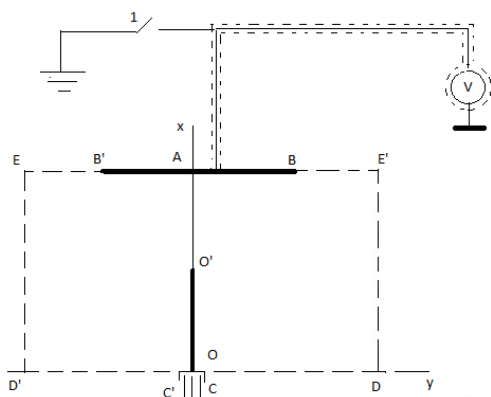


Рисунок 2 – Блок схема для определения разности потенциалов распыленных электростатическим способом частиц на подложке

Зная экспериментальную массу частиц m_3 на подложке и массу одной частицы вещества (предполагая, что частицы имеют шарообразную форму $m_4 = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho$) можно определить количество частиц на подложке:

$$N = \frac{m_3}{m_4}.$$

В качестве подложки использовалось три материала: металлическая пластина (20 см × 20 см), текстолит (12 см × 12 см), стекло (11 см × 11 см). В качестве мелкодисперсных порошков взяты: псевдобемит ($Al(OH)_3$, $a = 15$ мкм); оксид титана (TiO_2 , $a =$

5 мкм), глина ($a = 50$ мкм), алюминий (АСД-4, $a = 4$ мкм), оксид алюминия (Al_2O_3 , $a = 15$ мкм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислений и экспериментальных измерений представлены в таблице 1, в которой приведены значения заряда частицы и количества этих частиц на подложке различных материалов для различных порошков.

Самый большой заряд (таблица 1) приобретают частицы глины $\approx 1400 \cdot 10^{-18}$ Кл, поскольку ее частицы имеют самые большие размеры – радиус 50 мкм, соответственно, этот же порошок создает наименьшее количество вещества на подложке. Примерно в одном диапазоне по заряду находятся химические соединения оксида титана, алюминий и оксид алюминия $\approx 50 \cdot 10^{-16}$ Кл.

По материалу подложки: частицы псевдобемита и глины достигают максимального заряда на металле, а оксида титана и АСД-4 – на стекле, и только заряд частиц оксида алюминия достигает максимума на текстолите.

Подобные эксперименты были проведены с использованием электроскопа, только, вместо показаний вольтметра, как в первом эксперименте, разность потенциалов определялась в относительных единицах по отклонению стрелки от нейтрального значения. Электроскоп также предварительно был заземлен; на измерительном конце электроскопа прикреплялась полоска фольги, на которую напылялись следующие мелкодисперсные порошки: псевдобемит ($Al(OH)_3$, $a = 15$ мкм); оксид титана (TiO_2 , $a = 5$ мкм), глина ($a = 50$ мкм), алюминий (АСД-4, $a = 4$ мкм), оксид алюминия (Al_2O_3 , $a = 15$ мкм), мука ($a = 30$ мкм), оксид магния (MgO , $a = 5$ мкм), споры грибов ($a = 4$ мкм). После этого подложка из фольги, так же, как и в предыдущем эксперименте, взвешивалась на весах. Далее проводились расчеты заряда, массы частиц и количества частиц. Полученные результаты эксперимента и расчетов приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что наибольшего заряда достигают частицы муки и глины: порядка 10^{-13} Кл; наименьший заряд имеет оксид алюминия и споры грибов: порядка 10^{-19} Кл. Особый интерес эта таблица представляет в определении знака заряда. В результате экспериментальных исследований было определено, что только оксид магния и АСД-4 приобретают отрицательный заряд при электростатическом распылении, остальные вещества заряжаются положительно.

Таблица 1 – Электрические величины для мелкодисперсных порошков, измеренные с помощью вольтметра

| Материал | Вещество | Общий потенциал, В | Число частиц | Заряд одной частицы вещества, $\cdot 10^{-18}$ Кл | Число элементарных зарядов на одной частице |
|-----------|--------------------------------|--------------------|----------------------|---|---|
| Металл | AlOON | 0,019 | $1,7 \cdot 10^8$ | 11,5 | 71,64 |
| | TiO ₂ | 0,032 | $2,3 \cdot 10^{11}$ | 0,05 | 0,31 |
| | Глина | 0,02 | $3,5 \cdot 10^7$ | 1341,5 | 8384,49 |
| | АСД-4 | 0,016 | $1,1 \cdot 10^{11}$ | 0,05 | 0,318 |
| | Al ₂ O ₃ | 0,27 | $1,9 \cdot 10^{11}$ | 0,02 | 0,15 |
| Текстолит | AlOON | 0,013 | $2,3 \cdot 10^8$ | 5,88 | 36,76 |
| | TiO ₂ | 0,026 | $2,04 \cdot 10^{11}$ | 0,046 | 0,29 |
| | Глина | 0,011 | $3,5 \cdot 10^7$ | 737,83 | 4611,47 |
| | АСД-4 | 0,02 | $4,9 \cdot 10^{10}$ | 0,15 | 0,93 |
| | Al ₂ O ₃ | 0,26 | $2,23 \cdot 10^{10}$ | 0,19 | 1,22 |
| Стекло | AlOON | 0,012 | $5,8 \cdot 10^{10}$ | 2,17 | 13,57 |
| | TiO ₂ | 0,061 | $1,9 \cdot 10^{11}$ | 0,11 | 0,71 |
| | Глина | 0,02 | $4,2 \cdot 10^7$ | 1106,75 | 6917,2 |
| | АСД-4 | 0,017 | $7,2 \cdot 10^9$ | 0,86 | 5,42 |
| | Al ₂ O ₃ | 0,16 | $1,11 \cdot 10^{11}$ | 0,024 | 0,15 |

Таблица 2 – Электрические величины для мелкодисперсных порошков, измеренные с помощью электроскопа

| Материал | Вещество | Общий потенциал, отн. ед. | Число частиц | Заряд одной частицы вещества, $\cdot 10^{-18}$ отн. ед. | Знак заряда |
|----------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|---|-------------|
| Фольга | AlOON | 5 | $5,84 \cdot 10^8$ | 904,94 | + |
| | TiO ₂ | 5,5 | $5,87 \cdot 10^9$ | 340,8 | + |
| | Глина | 2 | $2,8 \cdot 10^7$ | 163963,44 | + |
| | АСД-4 | 4 | $5,3 \cdot 10^{10}$ | 27,57 | - |
| | Al ₂ O ₃ | 4,5 | $7,3 \cdot 10^{11}$ | 0,103 | + |
| | Мука | 6 | $1,76 \cdot 10^8$ | 14359,392 | + |
| | MgO | 4,5 | $6,4 \cdot 10^9$ | 32,95 | - |
| | Споры грибов | 4 | $2,68 \cdot 10^{10}$ | 0,896 | + |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, установлено, что частицы порошков, действительно, приобретают заряд, отличный от элементарного заряда электрона; значения величины и знака электрического заряда для конкретного распыленного вещества и подложки могут быть использованы в исследованиях по сорбции вредных веществ и в

разработке математических моделей по электростатическому взаимодействию частиц [7–11]. Положительный знак заряда для большинства исследуемых веществ играет важную роль в случае дальнейших работ по сорбции микроорганизмов, которые приобретают чаще всего отрицательные значения заряда [12, 13].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол_а 16-38-00581).

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов, В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В. Н. Ужов. – Москва, 1987. – 258 с.
2. Верещагин, И. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верещагин, В. И. Левитов. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.
3. Верещагин, И. П. Высоковольтные электротехнологии / И. П. Верещагин. – М.: МЭИ, 1999. – 92 с.
4. Степкина, М. Ю. Использование электрического поля для очистки поверхностей / М. Ю. Степкина, О. Б. Кудряшова, Е. В. Муравлев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 4, Т. 2. – С. 95–100.
5. Тукмаков, А. Л. Численная модель электрогазодинамики аэродисперсной системы на основе уравнений движения двухскоростной двух температурной газозвеси / А. Л. Тукмаков // Прикладная механика и техническая физика (ПТМФ). – Новосибирск, 2015. – № 4. – С. 112–120.
6. Овчаренко, А. Г. Измерение электростатических характеристик дисперсных и сплошных твердых сред материалов / А. Г. Овчаренко, С. Л. Раско // Ползуновский вестник. – 2008. – № 4. – С. 118–124.
7. Плющ, Ю. А. Определение величины заряда контактирующих материалов / Ю. А. Плющ, В. В. Иванов, С. В. Иванов // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – № 9. – С. 38–39.
8. Степкина, М. Ю. Экспериментальное исследование способа ускорения осаждения мелкодисперсного аэрозольного облака под действием электрического поля / М. Ю. Степкина, И. Р. Ахмадеев, Б. И. Ворожцов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 3. – С. 134–138.
9. Степкина, М. Ю. Управление процессом осаждения конденсируемой фазы с использованием электрического поля / М. Ю. Степкина, О. Б. Кудряшова // Известия Томского политехнического университета (Известия ТПУ). – 2015. – Т. 326, № 5. – С. 28–37.
10. Кудряшова, О. Б. Распыление нанопорошков для адсорбции токсичных веществ / О. Б. Кудряшова, М. Ю. Степкина, Н. В. Коровина, А. А. Ан-

тонникова, Е. В. Муравлев, А. А. Павленко // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 808–813.

11. Восканян, А. Г. Демонстрация закона Кулона на основе количественных измерений / А. Г. Восканян, А. Д. Марленский, А. Ф. Шибяев. – М.: Школа-Пресс, 1996. – 243 с.

12. Фомкин, А. А. Нанопористые материалы и их адсорбционные свойства / А. А. Фомкин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 133–149.

13. Лернер, М. И. Высокопроизводительный фильтр для очистки воды от коллоидных и микробиологических загрязнений / М. И. Лернер, О. В. Бакина, Е. А. Глазкова, Н. В. Сваровская, А. Н. Серова, С. Г. Псахье // Экология и промышленность России. – 2010. – С. 4–7.

Степкина Мария Юрьевна, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: tabric@mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.

Кудряшова Ольга Борисовна, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, ИПХЭТ СО РАН, e-mail: olgakudr@inbox.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.

Жирнов Анатолий Алексеевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, ИПХЭТ СО РАН, e-mail: toluol_88@mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47, факс: 8 (3854) 30-30-43.