

1
И. СТАРОВА и И. ШИМОРДА

СТАТИЧЕСКОЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Перевод с чешского
В. Л. СПИНАДЕЛЬ

Под общей редакцией *В. А. Смирнова*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

Рассматриваются проблемы удаления возникающих при различных технологических процессах электрических зарядов, препятствующих протеканию процессов и могущих быть причиной пожаров, взрывов и поражений людей. Изложены вопросы теории возникновения электрических зарядов при контакте, трении и ударе тел из различных материалов, данные о полярности, плотности и поведении зарядов и возникающих при этом напряжениях. Подробно разобраны способы борьбы с нежелательными зарядами и методы конструирования предназначенных для этой цели устройств. Дан ряд примеров полезного использования статических зарядов.

Книга предназначена для конструкторов, технологов, работников техники безопасности и других работников промышленности.

Автор *J. Šimorda a J. Staroba*

STATIČKĀ ELEKTRĪNA V PRŪMYSLU

SNTL, Praha, 1959.

Редактор *В. И. Тимохина*

Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 21/III 1960 г.

Подписано к печати 11/VI 1960 г.

T-06421 Бумага 84×108^{1/32}

12,41 печ. л.

Уч.-изд. л. 14,6

Тираж 6 500 экз.

Цена 11 р. 20 к.

Зак. 2157

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающее количество пожаров на машинах для прорезинивания тканей и многочисленные трудности, создаваемые статическими зарядами в резиновой и пластмассовой отраслях промышленности, заставили серьезно заняться разработкой мероприятий по удалению нежелательных электрических зарядов, уменьшению экономических потерь и затруднений при производстве. До сих пор у нас проблемам электростатики уделялось очень мало внимания и почти нет информации о способах эффективного удаления электрических зарядов. Данные иностранной литературы, обычно посвященные определенному типу нейтрализаторов, также мало помогают оценить эффективность и пригодность отдельных устройств для борьбы с нежелательными электрическими зарядами.

Поэтому мы остановились на подробном исследовании свойств отдельных основных типов нейтрализаторов, их конструкции, эффективности и возможности использования. Вопросы борьбы с электростатическими зарядами возникают почти во всех отраслях промышленности, однако до сих пор они нигде систематически не решались. Поэтому мы решили заполнить пробел в нашей литературе, опубликовав результаты работ как о возникновении, так и устранении нежелательных электрических зарядов в различных отраслях промышленности, дав обзор мнений иностранных авторов в виде отдельной книги.

Для полноты в книгу включены также главы об использовании статического электричества в промышленности и об измерительной технике. Главу об измерительной технике мы считаем очень важной, так как любое исследование электрических зарядов требует правильного выбора измерительных устройств и методов измерения.

Особый интерес для производителей представляет гл. 3, которая поможет разработке конструкций простых и эффективных типов нейтрализаторов, что окажет большую помощь в борьбе с производственными трудностями, вызванными статическими зарядами.

Эта книга может служить пособием при составлении инструкций по технике безопасности для отдельных технологических процессов. С этой точки зрения необходимо рассматривать приведенные указания по удалению зарядов и повышению безопасности отдельных процессов. Подробные инструкции и нормы можно будет разработать только после практического изучения использованных средств защиты при различных производственных процессах и на отдельных станках и устройствах.

В книге в доступной и простой форме изложены сведения, необходимые широкому кругу техников-производственников, конструкторов, ремонтных рабочих, технологов и рационализаторов всех отраслей, в которых возникают заряды.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Вводная	9
1. Общие соображения	9
2. Основные понятия	9
а) Электрические заряды	10
б) Возникновение электрических зарядов	10
в) Электрическая индукция	11
г) Проводники и изоляторы	12
д) Электрическое поле	12
е) Силовые линии электрического поля	13
ж) Потенциал и напряжение	14
з) Емкость и конденсаторы	16
и) Энергия электрического поля	17
к) Электрическое сопротивление и проводимость	18
л) Некоторые практические формулы	19
м) Ионизация воздуха	20
н) Электрический разряд	21
Глава вторая. Теория возникновения электрических зарядов	22
3. Теории возникновения электрических зарядов при трении и соприкосновении	22
а) Классификация твердых веществ	23
б) Контактная разность потенциалов при соприкосновении двух металлов	26
в) Контакт металла с изоляционным материалам	28
г) Контакт металла с полупроводником	29
д) Другие возможные явления, влияющие на возникновение электрических зарядов	31
е) Значение трения для возникновения электрических зарядов	34

ж) Возникновение электрических зарядов при движении жидкостей	35
4. Некоторые особые случаи возникновения электрических зарядов	40
а) Возникновение электрических зарядов при образовании льда	40
б) Возникновение зарядов при разрыве нитей	42
в) Влияние внешнего электрического поля на возникновение электрических зарядов при контакте и трении	42
5. Полярность и величина электрических зарядов	44
а) Максимальная плотность зарядов	44
б) Полярность электрических зарядов	47
в) Некоторые примеры обнаруженных напряжений в различных случаях возникновения электрических зарядов	50
Глава третья. Удаление электрических зарядов	50
6. Общие соображения	50
а) Ионизация воздуха	52
б) Увеличение емкости системы	53
в) Уменьшение числа оборотов станка и благодаря этому уменьшение скорости разматывания или перемещения обрабатываемого материала	53
г) Образование противоположных зарядов в материале	54
д) Изготовление трущихся поверхностей из однородных материалов	54
7. Заземление станка и его частей	55
8. Увеличение поверхностной проводимости	57
а) Увеличение относительной влажности воздуха	58
б) Химическая обработка поверхности	60
9. Ионизация воздуха электростатическими нейтрализаторами	64
10. Индукционные нейтрализаторы	66
а) Индукционные нейтрализаторы с остриями	68
б) Проволочные индукционные нейтрализаторы	79
11. Нейтрализаторы с высоким напряжением	80
а) Нейтрализаторы с переменным напряжением	81
б) Нейтрализаторы с постоянным напряжением	93
в) Высокочастотные нейтрализаторы	99
12. Радиоактивные нейтрализаторы	103
а) Нейтрализаторы с α -излучением	106
б) Нейтрализаторы с β -излучением	112
13. Комбинированные нейтрализаторы	115
14. Сравнение эффективности различных типов нейтрализаторов	117

Глава четвертая. Статические заряды как причина взрывов	119
15. Горючие и взрывчатые материалы	119
16. Воспламенение взрывчатых смесей газов или паров с воздухом электрическими искрами	122
17. Электрический заряд и воспламенение взрывчатой пыли	128
Глава пятая. Примеры возникновения и удаления электрических зарядов	133
18. Статические заряды в текстильной промышленности	133
19. Переливание горючих жидкостей	144
20. Статические заряды на приводных ремнях и лентах транспортеров	153
21. Статические заряды в резиновой промышленности	158
22. Статические заряды на перевозочных средствах с пневматическими шинами	163
23. Статические заряды на изделиях из пластмасс	170
24. Статические заряды в авиации	174
25. Статические заряды в типографиях и на бумажных фабриках	180
26. Электрический заряд людей	183
27. Статические заряды в медицине	185
28. Статические заряды при движении газов и паров	188
29. Статические заряды в мастерских химической чистки и красильнях	190
30. Статические заряды при движении щеток и т. п.	192
31. Статические заряды при работе с сыпучими материалами	193
Глава шестая. Некоторые примеры промышленного использования статических зарядов	194
32. Электрические отделители	194
33. Измерение степени окисления угля при помощи электрических зарядов	199
34. Дальнейшие возможности использования	201
Глава седьмая. Электростатические измерения	204
35. Описание измерительных устройств	204
а) Лампы глеющего разряда	204
б) Электроскопы и электрометры	205
в) Электростатические вольтметры	206
г) Шаровые разрядники	208
д) Микроамперметры и гальванометры	209
е) Электронные электрометры	212

ж) Измеритель электрических зарядов фирмы К. Р. Mundinger	220
з) Сигнализирующий измеритель электрических зарядов	221
и) Приборы для измерения емкости	221
к) Приборы для измерения больших сопротивлений	223
36. Методы измерений	223
а) Статическое измерение электрических зарядов	223
б) Измерение электрических зарядов	229
в) Измерение слабых постоянных токов	233
г) Измерение больших сопротивлений	234
д) Измерение емкости	238
Литература	239

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВОДНАЯ

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Вероятно, все помнят школьные опыты получения электрических зарядов при трении изоляционных материалов. Глядя на эти опыты, как на простую забаву, не представляешь себе, что почти во всех отраслях промышленности в подобных же случаях возникают электрические заряды, при искровом разряде которых может возникнуть пожар или взрыв, приводящий к значительным убыткам, увечьям или человеческим жертвам.

Во многих машинах электрические заряды затрудняют работу вследствие взаимного притяжения или отталкивания заряженных частиц, что препятствует увеличению скорости работы. Это особенно важно в настоящее время, когда во всех областях промышленности борются за непрерывный рост производительности труда.

Статические заряды могут возникнуть при соприкосновении или трении двух твердых материалов, при движении жидкостей, паров или газов в трубках и пыли в воздухе при разбрызгивании жидкостей, перемалывании и пересыпании, например сахара, при ходьбе на резиновых подошвах, тряске, стирании, езде автомобиля, фильтрации и т. д.

Потенциалы заряженных предметов часто очень значительны и измеряются десятками и сотнями киловольт.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прежде чем приступить к самой проблеме возникновения, удаления и измерения нежелательных электрических зарядов, кратко напомним необходимые важнейшие поня-

тия электростатики и электротехники. Подробное изложение их выходит за пределы этой книги и содержится во многих специальных пособиях.

а) Электрические заряды

Уже в VII в. до н. э. греческий философ Фалес Милетский описал способность янтаря притягивать некоторые легкие предметы, если его потереть шерстяной тканью. В XVI и XVII вв. выяснилось, что таким же свойством обладают стекло и многие другие материалы, если их натирать шелком.

Исследование этого явления протекало совершенно независимо от исследования остальных природных явлений. Исследовалась главным образом электризация тел трением и изучались силы притяжения между ними. Эта часть науки об электричестве позже получила название *электростатики*. Если говорят (не совсем правильно) о *статическом электричестве*, то имеют в виду явления, сопровождающие состояние покоя электрических зарядов, в противоположность от сильно отличающейся группы таких явлений, как возникновение тепла, химические действия и возникновение магнитного поля, являющихся следствием *динамического электричества*, т. е. движения электрических зарядов.

Возникновение статических зарядов в определенном устройстве во время производственного процесса обычно приводит к накоплению все большего заряда, а в конце концов к превышению электрической прочности окружающего воздуха и возникновению искрового разряда.

Разумеется, электричество, перемещающееся в искре, очень далеко в этот момент от «статического», но с точки зрения первоначального происхождения заряда такие искры также называют электростатическими.

б) Возникновение электрических зарядов

Уже первые опыты в XVII столетии показали, что существует два вида наэлектризованных тел. Тела, наэлектризованные положительно (подобно стеклу, натертому кожей), и тела, наэлектризованные отрицательно (аналогично коже, натертой стеклом). Тела с одноименными зарядами взаимно отталкиваются; тела, наэлектризованные разноименно, притягиваются. Тело в наэлектризованном состоянии обладает, как было указано, зарядом, который

служит мерой электризации тела. Степень электризации можно определить по силе взаимодействия наэлектризованных тел.

Если телу, заряженному положительно, начнем сообщать отрицательный заряд, степень его электризации будет уменьшаться до тех пор, пока тело не перестанет быть наэлектризованным, после чего оно начнет заряжаться отрицательно.

Следовательно, разноименные заряды взаимно компенсируются. Это приводит к представлению о том, что в незаряженных телах заряды одной и другой полярности одинаковы, поэтому они не вызывают внешнего действия.

Тело, обладающее, например, избытком отрицательных зарядов, заряжено отрицательно.

При электризации тел трением электризуются оба тела; одно из них всегда положительно, другое — отрицательно. Таким образом, приходим к заключению, что заряды не возникают и не исчезают, но их можно переносить с одного тела на другое или перемещать в пределах одного тела.

Это основной закон науки об электричестве — закон сохранения электрических зарядов, подтвержденный многочисленными опытами.

В настоящее время известно, что существуют элементарные электрические заряды, называемые *электронами*, которые являются элементарным количеством отрицательного электричества. Электроны содержатся в электронной оболочке каждого атома.

Отрицательно заряженное тело обладает избытком электронов. Единицей электрического заряда является *кулон* (κ).

в) Электрическая индукция

Если поднести к изолированному проводнику B заряженное тело A (рис. 1), то на проводнике B обнаруживаются заряды: на стороне, обращенной к проводнику A , — заряд противоположной полярности, а на удаленной стороне — той же полярности, что и заряд тела A .

При удалении тела A заряд B уменьшается.

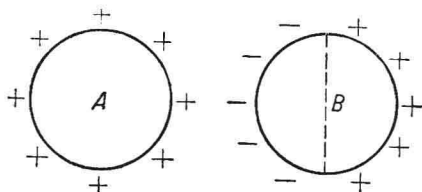


Рис. 1. Электризация путем индукции.

Если же перед удалением заряженного тела A раздвинем обе части проводника B , то на каждой части останутся неизменные заряды соответствующей полярности и после удаления тела A .

Электрическая индукция имеет в электростатике большое значение.

г) Проводники и изоляторы

Все вещества делят на две основные группы: 1) вещества, в которых электрические заряды могут перемещаться (*проводники*), и 2) в которых электрические заряды не могут перемещаться (*непроводники, изоляторы, диэлектрики*). В проводниках первого класса (металлы) перемещение электрических зарядов не связано с химическими изменениями, в проводниках второго класса (расплавленные соли, растворы кислот, оснований и т. д.) перенос электрических зарядов сопровождается в местах соединения с проводниками первого класса разложением на группы, из которых состоят проводники второго класса. В особую группу выделены *полупроводники* с малой, но явно выраженной проводимостью.

В металлах часть электронов может свободно двигаться между отдельными атомами, и электризация металлов связана с изменением числа электронов, которые сообщаются телу или отнимаются у него.

Диэлектрики состоят из нейтральных молекул или ионов, которые не могут в них свободно перемещаться. Если приблизить к диэлектрику заряженное тело, заряды не перемещаются, а поворачиваются так, что на конце диэлектрика, обращенном к заряженному телу, появляется заряд противоположной полярности, а на другом конце — заряд той же полярности. Такое состояние диэлектрика называется *поляризацией*.

При разделении поляризованного диэлектрика на части каждая часть в целом остается электрически нейтральной и только на поверхности появляются заряды (связанные) той или иной полярности.

д) Электрическое поле

Появление электрического заряда в пространстве сопровождается возникновением электрического поля.

Если заряд находится в покое, то поле вокруг него называют электростатическим полем. О величине заряда су-

дят по напряженности поля, причем исходят из того основного положения, что сила, с которой заряд действует на все остальные заряды, пропорциональна его собственной величине.

Аналогично силе света *напряженность электрического поля* убывает с квадратом расстояния вследствие того, что на расстоянии r действие точечного заряда распространяется на поверхность шара площадью $4\pi r^2$.

Взаимодействие двух точечных зарядов выражается *законом Кулона*:

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2} \text{ [н; к, ф/м, м]}^*, \quad (1)$$

который утверждает, что сила взаимодействия F между двумя точечными зарядами Q и q пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r (для пустоты или воздуха $\epsilon_r = 1$, а $\epsilon_0 = 8,853 \cdot 10^{-12}$ ф/м).

Поле точечного заряда Q можно характеризовать (независимо от наличия других источников) силой, с которой оно действует на единичный положительный заряд в данной точке; напряженность электрического поля

$$E = \frac{F}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2} \text{ [в/м; н: к, ф/м, м]}. \quad (2)$$

е) Силовые линии электрического поля

Если построить в каждой точке пространства векторы такой величины и направления, которые соответствовали бы напряженности электрического поля в точках, то эти векторы покажут направление движения положительного заряда, не нарушающего своим присутствием данного поля.

Линии, по которым двигается в электрическом поле небольшой заряд, не нарушающий своим собственным полем основное, называют силовыми линиями поля или *электрическими силовыми линиями*. Через каждую точку проходит только одна силовая линия, и касательная к ней

* В квадратных скобках сначала указано наименование величин, входящих в левую часть формулы, затем величин, стоящих в числителе и знаменателе.

определяет направление вектора напряженности поля в этой точке.

Вектор напряженности поля считают направленным от положительного заряда к отрицательному. На рис. 2,а, на котором обозначены силовые линии вокруг положительного точечного заряда, видно, что они распределяются на шаровую поверхность, равную $4\pi r^2$. Плотность силовых

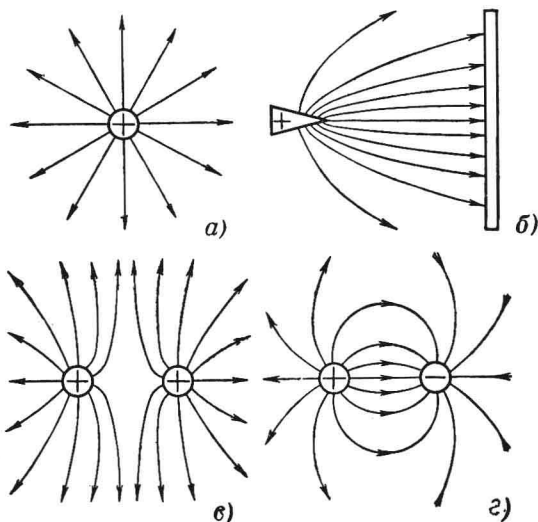


Рис. 2. Силовые линии электрического поля.

линий с увеличением расстояния от заряда уменьшается [в соответствии с формулой (2)] так же, как и напряженность поля. Плотность их определяет, таким образом, величину напряженности поля. Распределение силовых линий, их плотность и направление в пространстве для нескольких зарядов получают векторным сложением напряженностей полей отдельных зарядов.

Некоторые примеры видов полей показаны на рис. 2,б—г.

ж) Потенциал и напряжение

В электрическом поле каждый точечный заряд подвергается действию силы, равной произведению напряженности поля на величину этого заряда. Если подвергнуть свободный заряд q воздействию поля заряда Q , то на него будет действовать в каждой точке поля в направлении

силовых линий сила Eq , которая при перемещении заряда на расстояние dr производит работу

$$dA = Eqdr.$$

Если дать заряду q удалиться от заряда Q с расстояния r в бесконечность (практически на такое расстояние, на котором поле заряда Q уже нельзя обнаружить), то поле совершит работу

$$A = q \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}.$$

Выражение

$$\frac{A}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} = \varphi_r \quad [\text{дж}, \text{к}; \text{к/ф}, \text{к}, \text{м}; \text{в}] \quad (3)$$

не зависит от величины заряда q , прямо пропорционально величине точечного заряда Q , возбуждающего поле, и обратно пропорционально расстоянию r . Эта величина для любого r называется *потенциалом* поля точечного заряда и численно равна работе, произведенной полем при перенесении единичного заряда по любой силовой линии в бесконечность.

Практической единицей потенциала является *вольт* (в).

В любом электрическом поле, возбужденном произвольно расположенными зарядами, работа не производится при движении перпендикулярно направлению силовых линий. Так как при таком движении потенциал не меняется, то каждая поверхность, которая везде перпендикулярна силовым линиям, является поверхностью постоянного потенциала (эквипотенциальной) или *поверхностью уровня*.

Если известно изменение потенциала, то напряженность поля, направление которой везде перпендикулярно к эквипотенциальным поверхностям, можно определить из выражения

$$E = - \frac{d\varphi}{dr}.$$

Напряженность поля, таким образом, равна уменьшению потенциала, причем уменьшение потенциала относят к единице перемещения в направлении, перпендикулярном эквипотенциальной поверхности.

Единицей напряженности электрического поля и убывания потенциала является *вольт на метр* (в/м).

В проводниках заряд свободно перемещается; заряды одинаковой полярности внутри тела отталкиваются и перемещаются на поверхность проводника, где они располагаются в соответствии с конфигурацией поля. Проводники, изолированные друг от друга, могут обладать и обычно обладают различными потенциалами. Разность потенциалов называют напряжением и говорят в этих случаях о напряжении между двумя проводниками. Проводник, который имеет более высокий потенциал, заряжен положительно по отношению к проводнику с более низким потенциалом, а в противном случае — отрицательно.

В соответствии с приведенным выше определением потенциал проводника является напряжением по отношению к местам, бесконечно удаленным от всех зарядов, которым соответствует нулевой потенциал. На практике за нулевой потенциал можно принять потенциал земли, а также всех проводников, соединенных с ней, т. е. заземленных. Поэтому потенциал проводника можно определить как его напряжение относительно земли (проводника с нулевым потенциалом).

3) Емкость и конденсаторы

Величина заряда, необходимого для достижения потенциала φ , пропорциональна величине этого потенциала; поэтому можно написать, что

$$Q = C\varphi \quad [к; \varphi, в], \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности C является *емкостью* проводника. Во сколько раз больше емкость проводника, во столько раз больший заряд необходим для того, чтобы потенциал проводника достиг требуемой величины. Следовательно, емкость является отношением величины заряда к потенциалу:

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad [\varphi; к, в]; \quad (5)$$

единица ее измерения — *фарада* (φ).

Для практических целей, однако, эта единица слишком велика, поэтому пользуются десятичными дольными единицами:

$$\text{микрофарада} — 1 \text{ мк}\varphi = 10^{-6} \varphi;$$

$$\text{пикофарада} — 1 \text{ пк}\varphi = 10^{-12} \varphi.$$