

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Московский энергетический институт
(Технический университет)

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие
по курсу
«Основы электротехнологии»

Под редакцией
И.П. Верещагина

Москва МЭИ 1999

ПРЕДИСЛОВИЕ

Традиционно при подготовке инженеров–технологов круг рассматриваемых электротехнологий ограничивался классическими рамками термических, электрохимических, электросварочных, ультразвуковых и некоторых других широко распространенных технологий. Наряду с этим в последнее десятилетие активно развивались новые электрофизические технологии, в том числе основанные на использовании высоких напряжений. Речь идет не об отдельных экзотических примерах, а о технологиях получивших достаточно широкое промышленное применение.

Курс лекций по технологическим процессам, связанным с применением сильных электрических полей, читался для специалистов по технике высоких напряжений уже более 15 лет. Два года назад впервые для этих же специалистов был прочитан курс лекций по новым электротехнологическим процессам, связанным с применением сильных электрических, магнитных полей и электроразрядной плазмы.

Примерно в то же время было решено расширить содержание курса «Основы электротехнологии», который как базовый курс читается студентам института электротехники МЭИ. Этот курс был разделен на две части, из которых первая включала основы электротермии, а вторая, равная по объему первой – высоковольтные электротехнологии.

Чтение второй части курса и создание соответствующей учебной лаборатории было поручено кафедре техники и электрофизики высоких напряжений. С тех пор накоплен определенный опыт преподавания, совершенствовалась методика чтения разделов курса, связанных с высоковольтными электротехнологиями.

Задачи, преследуемые в этих разделах курса, можно сформулировать следующим образом:

1. Познакомить будущих инженеров электротехников с возможностями новых электротехнологических процессов, основанных на использовании прямого воздействия на материал сильных электрических и магнитных полей, применении плазмы газового разряда для плазмохимических преобразований газовой среды и материалов, электроимпульсных методов воздействия на материал;

2. Заложить основы знаний по физике газового разряда, электрогазодинамике дисперсных систем и физике плазмы, необходимых для более глубокого и систематизированного понимания излагаемого материала;

3. На основе конкретных примеров показать энергетическую, эргономическую и экологическую эффективность новых электротехнологических процессов по сравнению с традиционными.

В связи с тем, что содержание курса базируется на новых разработках, которые отражены только в монографиях и статьях в научно-технических журналах, то до сих пор отсутствует учебник или учебное пособие, которое можно было бы рекомендовать студентам.

Поэтому возникла необходимость в подготовке учебного пособия, что и было осуществлено преподавателями и научными сотрудниками кафедры ТЭВН, которые длительное время работают в области высоковольтных электротехнологий. Авторский коллектив включает к.т.н. ст. преп. Аношина О.А., к.т.н. ст. преп. Белогловского А.А., д.т.н. проф. Верещагина И.П., к.т.н. ст. преп. Калинина А.В., к.т.н. ст. преп. Кривова С.А., к.т.н. доц. Кужекина И.П., к.т.н. доц. Орлова А.В., к.т.н. ст. преп. Панюшкина В.В., к.т.н. снс Соколову М.В., к.т.н. доц. Темникова А.Г. Общая редакция осуществлена проф. Верещагиным И.П.

Текст учебного пособия состоит из 14 глав.

В первых четырех главах изложены в компактной форме сведения из физики газового разряда и физики плазмы, которые используются в технологиях, основанных на действии сильных электрических полей и в плазмо-химических технологиях.

Пятая глава содержит теоретические основы технологий, базирующихся на использовании сильных электрических полей, а в последующих шести главах дано описание конкретных технологий этого типа.

Завершает учебное пособие краткое описание плазмо-химических технологий, технологий, основанных на импульсном воздействии на материалы (электрогидравлическая, электроэрозсионная и магнитно-импульсная), а также конструкции и области применения электрогазодинамических устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Технология – слово греческого происхождения от слова *techne*, означает искусство, мастерство, умение. В современном понимании, технология – это совокупность методов обработки, изготовления, изменение состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Задача технологии как науки – исследование и выявление физических, химических, механических и иных закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов.

В условиях рыночной экономики и бурного научно-технического прогресса роль новых технологий трудно переоценить. Современная история экономического развития общества – это история разработки и внедрения новых технологий. Возьмем к примеру историю образования и развития какой-нибудь современной транснациональной корпорации и мы увидим, что это история развития передовых технологий. Только этот путь сегодня может обеспечить возможность развития бизнеса в условиях жесточайшей конкуренции. В качестве примера можно привести фирмы развившиеся на основе новой технологии – электрографии. Сегодня не только фирмы-гиганты развиваются таким образом. Появилось даже новое понятие «патентные технологии», то есть технологии, позволяющие развиваться и даже становиться монополистами достаточно небольшим фирмам овладевшим современными не имеющими аналогов технологиями.

Что же дают новые технологии? Во-первых, создание принципиально новых продуктов, услуг, материалов и оборудования (например лазерные технологии и появление новых информационных технологий). Во-вторых, получение уже известных товаров нового качества (например, кевлара по своим прочностным характеристикам во много раз превосходящего ранее известные материалы). В-третьих, возможность снижения себестоимости производства уже известных продуктов (пример, совершенствования персональных компьютеров).

Высоковольтные технологии можно разделить на следующие группы:

- технологии, основанные на применении сильных электрических полей;
- электроимпульсные технологии;
- плазмохимические технологии.

Технологии, основанные на силовом действии электрического поля на заряженные частицы материалов, находят применение при очистке дымовых газов от частиц золы, при электроокраске и нанесении порошковых полимерных покрытий, как процессы электрографии, разделения диспергированных полезных ископаемых на компоненты и т.д.

Электроимпульсные технологии включают магнитно-импульсное воздействие на материалы, электроэрозионную обработку материалов, использование импульсных разрядов в воде.

Плазмохимические технологии связаны с использованием свойств неравновесной плазмы газового разряда, в том числе для очистки газов от вредных примесей, обработки поверхности металлов и органических материалов, придания новых свойств известным и получения новых материалов и изделий.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Электрофизические процессы в газах	7
1.1. Характеристики газовой среды	7
1.2. Характеристики ионизованного газа	8
1.3. Дрейф заряженных частиц в электрическом поле. Подвижность	10
1.4. Коэффициент ударной ионизации	10
1.5. Коэффициент прилипания. Эффективный коэффициент ионизации.....	12
1.6. Процессы возбуждения	13
1.7. Различные виды ионизации в газах	14
1.8. Диссоциация молекул	16
1.9. Рекомбинация	16
1.10. Процессы вторичной ионизации	17
2. Физика газового разряда.....	19
2.1. Развитие разряда в однородном поле при постоянном напряжении	19
2.2. Развитие разряда в резко-неоднородных полях	22
2.3. Влияние формы воздействующего напряжения на развитие разряда.....	25
3. Основные понятия физики плазмы.....	27
3.1. Определение плазмы и ее основные свойства	27
3.2. Дебаевский радиус экранирования	29
3.3. Плазма в электрическом поле.....	30

4.1. Формы коронного разряда.....	31
-----------------------------------	----

4.2. Униполярный коронный разряд	32
--	----

5. Технологические процессы, основанные на силовом воздействии электрических полей на материалы 39

5.1 Введение	39
--------------------	----

5.2. Зарядка частиц.....	41
--------------------------	----

5.2.1. Ионная зарядка	41
-----------------------------	----

5.2.2. Индукционная зарядка частиц.....	46
---	----

5.2.3. Статическая электризация	50
---------------------------------------	----

5.3. Движение частиц в электрическом поле	50
---	----

5.4. Коллективные процессы в заряженном аэрозоле	57
--	----

6. Очистка газов от частиц в электрофильтрах	58
--	----

6.1. Задача очистки газов от пыли.....	58
--	----

6.2. Принципиальная схема электрофильтра.....	59
---	----

6.3. Степень очистки газов в электрофильтре	59
---	----

6.4. Влияние концентрации дисперсной фазы на характеристики коронного разряда и процесс очистки газа электрофильтрами	62
---	----

6.5. Формирование слоя частиц на электроде и возникновение обратного коронного разряда	64
--	----

6.6. Конструкция электрофильтров	67
--	----

7. Нанесение покрытий в электрическом поле	69
--	----

7.1. Электроокраска	69
---------------------------	----

7.2. Нанесение порошковых покрытий	71
--	----

8. Электросепарация	81
---------------------------	----

8.1. Классификация сепараторов.....	81
-------------------------------------	----

8.2. Сепарация по электропроводности.....	82
---	----

8.2.1. Барабанные электростатические сепараторы.....	82
--	----

8.2.2. Барабанные коронные сепараторы.....	83
--	----

8.2.3. Барабанные коронно-электростатические сепараторы	83
---	----

8.2.4. Лотковые наклонные электростатические сепараторы	85
---	----

8.3. Трибоэлектростатическая сепарация.....	86
---	----

8.4. Пироэлектрическая сепарация	89
--	----

8.5. Диэлектрическая сепарация.....	90
-------------------------------------	----

9. Электropечать	92
------------------------	----

9.1. Применение электropечати	92
-------------------------------------	----

9.2. Электрофотография.....	92
-----------------------------	----

9.3. Электрокаплеструйная печать	99
--	----

10. Нейтрализация зарядов статического электричества.....	102
---	-----

10.1. Основные понятия	102
------------------------------	-----

10.2. Статическое электричество при перекачке нефти по трубопроводам	103
--	-----

10.2.1. Физика образования и накопления заряда.....	103
---	-----

10.2.2. Технологический процесс транспортировки нефти	104
---	-----

10.2.3. Воспламенение паров нефти.....	107
--	-----

10.3. Методы измерения основных параметров, характеризующих статическую электризацию	110
--	-----

10.3.1. Измерение токов электризации	110
--	-----

10.3.2. Измерение параметров зарядов и напряженности поля	111
---	-----

10.4. Способы защиты от разрядов статического электричества	113
---	-----

11. Обезвоживание нефтепродуктов	117
--	-----

11.1. Требования содержанию воды и солей в нефтепродуктах	117
---	-----

11.2. Теоретические основы обезвоживания нефтепродуктов	118
---	-----

11.2.1. Седиментация капель воды в нефтепродукте	119
--	-----

11.2.2. Движение заряженных капель в электрическом поле в нефтепродукте	120
---	-----

11.2.3. Процессы укрупнения капель воды	120
---	-----

11.2.4. Зарядка капель воды в нефтепродукте.....	122
--	-----

11.3. Конструкции промышленных технологических установок для обессоливания и обезвоживания нефти и нефтепродуктов.....	126
--	-----

11.4. Технологии обезвоживания нефтепродуктов	128
---	-----

11.4.1. Глубокое обезвоживание нефтепродуктов	128
---	-----

11.4.2. Сверхглубокое обезвоживание	129
---	-----

11.4.3. Обезвоживание высокообводненных нефтей и аномально стойких эмульсий	130
---	-----

12. Технологии с применением плазмо–химических реакций..... 133

12.1. Основы плазмо–химических преобразований	133
---	-----

12.1.1	Понятие кинетики химических реакций.....	133	
12.1.2.	Особенности плазмо–химических, фото–химических и радиационно–химических реакций	137	
12.2.	Генераторы озона и озонные технологии.....	138	
12.2.1.	Физико-химические и биологические свойства озона	138	
12.2.2.	Основные способы получения озона.....	140	
12.2.3.	Технологическое применение озона.....	152	
12.3.	Технологии конверсии газов в плазме газового разряда	162	
12.4.	Модификация поверхности материалов в плазме газового разряда	170	
13.	Технологии импульсного воздействия на материал	174	
13.1.	Введение	174	
13.2.	Электрогидравлическая технология	174	
13.2.1.	Основные сведения.....	174	
13.2.2.	Технологические применения разряда в жидкости	178	
13.3.	Электроэрозионная обработка материалов	180	
13.3.1.	Основные сведения.....	180	
13.3.2.	Физические основы электроэрозионной обработки металлов	183	
13.4.	Магнитно-импульсная обработка материалов	186	
13.4.1.	Основные сведения.....	186	
13.5.	Разновидности магнитно-импульсной обработки	188	
13.5.3.	Генераторы токов для магнитно-импульсной обработки	192	
13.5.4.	Технологические особенности	193	
14.	Аэрозольные электрогазодинамические устройства	194	
14.1	Общая характеристика	194	
14.2.	Конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля.....	196	
14.3.	ЭГД-генераторы.....	196	
14.4.	ЭГД-компрессор	197	
	Список литературы	199	

1. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

1.1. Характеристики газовой среды

Любая равновесная газовая среда, включая воздух, описывается рядом параметров, используемых при расчетах характеристик электрического разряда в газе. Такими параметрами являются: концентрация молекул или атомов газа – n , равная числу частиц в единице объема, давление газа p , температура газа T . Эти величины связаны уравнением состояния

$$p = nkT, \quad (1.1)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж/град.

При давлении $p_0 = 1$ атм = 760 мм рт.ст. и температуре $T_0 = 0^\circ\text{C} = 273$ К плотность любого газа имеет вполне определенное значение, называемое числом Лошмидта, $n_0 = 2,687 \cdot 10^{19}$ 1/см³. Тогда при любом другом давлении и температуре

$$n = n_0 (pT_0)/(p_0T) \text{ или } n = (273p)/(273 + T_1)p_0 \quad (1.2)$$

если температура T_1 в (1.2) имеет размерность градусов Цельсия.

Под воздействием электрического поля в газе начинаются электрофизические процессы, которые могут привести к развитию электрического 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 не только от напряжения U , приложенного к газовому промежутку, но – в первую очередь – от конфигурации электрического поля и распределения в нем напряженности поля

$$E = -d\varphi/dx \quad (1.3)$$

Различают однородные, слабо-неоднородные поля и резко-неоднородные поля. В первых двух случаях отношение максимальной напряженности поля в промежутке к ее среднему значению, называемое коэффициентом неоднородности поля k_n , составляет 1 (однородное поле) или не превышает 1,3÷1,5 (слабо-неоднородное поле). В однородном поле $E = U/d$. В случае большого коэффициента неоднородности ($k_n \geq 4$) поле в промежутке является резко-неоднородным.

В зависимости от напряженности электрического поля и степени его неоднородности в газовом промежутке может установиться разная форма электрического разряда. При этом основные электрофизические процессы, приводящие к развитию разряда, во всех газах примерно одинаковы, меняется только их интенсивность. Поэтому, прежде чем рассматривать разные формы разряда, рассмотрим различные электрофизические процессы, которые могут происходить в газе, и их зависимость от напряженности электрического поля.

1.2. Характеристики ионизованного газа

Даже в отсутствие внешнего электрического поля в газе, кроме нейтральных молекул или атомов, может быть какое-то число свободных электронов и ионов разного знака. Заряженные частицы возникают либо под действием внешнего источника ионизации (в воздухе это – космическое излучение), либо создаются искусственно в лаборатории облучением промежутка светом ультрафиолетовой лампы. Считается, что в воздухе так называемая фоновая концентрация заряженных частиц составляет примерно 10^3 1/см³.

В электрическом поле с напряженностью \vec{E} на заряженную частицу, имеющую заряд q (для электрона это заряд e), действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1.4)$$

Под действием этой силы происходит движение заряженных частиц в направлении поля, причем в процессе такого движения заряженные частицы приобретают энергию от поля, равную $W = qxE$, где x – путь, пройденный частицей в направлении поля. Для электрона эта приобретенная энергия равна $W = exE$. Скорость движения электронов вдоль поля почти на три порядка больше скорости движения ионов за счет их разных масс, поэтому энергия, набираемая электронами, быстро возрастает.

При движении электронов в газе происходят их столкновения с нейтральными молекулами. Путь между двумя последовательными столкновениями называется длиной свободного пробега электрона. В общем случае эти длины имеют вероятностный характер и определяются функцией распределения энергий электронов. В расчетах часто используется средняя длина свободного пробега λ_e , являющаяся функцией средней энергии электронов. В свою очередь, длина свободного пробега должна определяться плотностью газа, то есть его давлением. Приводимые в литературе значения λ_{e1} обычно даются для давления 1 мм рт.ст. и температуры 0°C . Тогда для другого давления p $\lambda_e = \lambda_{e1}/p$.

Одновременно с приобретением энергии электроны теряют ее при столкновениях с молекулами или атомами газа, причем в зависимости от доли теряемой энергии различают упругие и неупругие столкновения.

При упругих столкновениях доля теряемой электроном и приобретаемой молекулой энергии $f \equiv m_e/M$, где m_e и M – массы электрона и молекулы, что дает $f \approx 10^{-3}$. Энергия, переданная в результате большого числа упругих

столкновений между многими электронами и молекулами газа, приводит к увеличению кинетической энергии нейтральных молекул, что выражается в повышении температуры газа.

При большой энергии сталкивающегося электрона возможно неупругое столкновение. При *неупругих* столкновениях электрон передает молекуле большую часть своей энергии, что приводит к переходу молекулы в новое состояние, определяемое значением полученной энергии. Неупругие столкновения могут сопровождаться ионизацией, при которой из нейтральной молекулы образуется положительный ион и свободный электрон, электронным возбуждением молекулы, при котором один из электронов на ее оболочке переходит на более высокий энергетический уровень, или диссоциацией молекулы, при которой молекула распадается на две нейтральные, заряженные или возбужденные частицы.

Особенностью перечисленных видов неупругих столкновений для большинства газов является наличие четко выраженных пороговых энергий: энергии электронного возбуждения – $W_{\text{в}}$, энергии диссоциации – $W_{\text{д}}$, энергии ионизации – $W_{\text{и}}$, ниже которых соответствующие реакции происходить не могут. Это связано со структурой атомов или молекул, с которыми взаимодействует свободный электрон. Их переход в новое состояние при столкновении с электроном возможен только при передаче им энергии, равной или большей пороговой.

Каждый процесс неупругого столкновения характеризуют соответствующим обобщенным коэффициентом, равным числу столкновений данного вида, осуществляемых одним электроном на пути в 1 см вдоль поля.

1.3. Дрейф заряженных частиц в электрическом поле. Подвижность

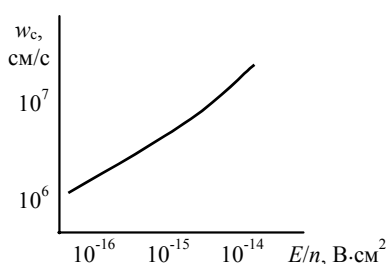


Рис. 1.1. Скорость дрейфа электронов в воздухе в зависимости от приведенной напряженности электрического

Полная скорость движения заряженной частицы в электрическом поле имеет две составляющие: скорость теплового хаотического движения w и направленную скорость под действием поля u .

$$\vec{v} = \vec{w} + \vec{u}. \quad (1.5)$$

Для совокупности заряженных частиц рассматривается средняя скорость всех частиц. Средняя скорость направленного движения w носит название *скорости дрейфа*. Как показывают экспериментальные данные, эта скорость зависит от отношения E/n , где n – плотность молекул газа, и от сорта газа. При этом скорость дрейфа электронов существенно выше скорости дрейфа ионов.

На рис.1.1 приведена зависимость скорости дрейфа электронов в воздухе от значений E/n .

В общем случае скорость дрейфа

$$\vec{w} = k\vec{E}, \quad (1.6)$$

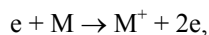
где k – носит название *подвижности*. Особенностью этой величины является то, что и для ионов, и для электронов существует широкая область значений напряженности, при которых в воздухе значения подвижности почти постоянны.

Для ионов в области значений поля, соответствующих развитию разряда, и при нормальных условиях газа значения подвижности в воздухе составляют $K_{\text{и}}^+ = 2,0 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $K_{\text{и}}^- = 2,2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Для электронов $K_{\text{э}} = (4 \div 5) \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что, как видно, на два порядка выше, чем у ионов.

1.4. Коэффициент ударной ионизации

Этот коэффициент является самой важной характеристикой, используемой в теории газового разряда и определяющей основную реакцию, приводящую к развитию разряда. Ударная ионизация может быть представлена реакцией вида



где M – атом или молекула газа.

Коэффициент ударной ионизации равен числу актов ионизации, осуществляемых одним электроном на пути в 1 см вдоль поля. Энергия ионизации – $W_{\text{и}}$, для большинства газов составляет $12 \div 20 \text{ эВ}$:

Газ	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
Энергия ионизации, эВ	12,5	12,6	14,4	15,5

Коэффициент ударной ионизации, обозначаемый обычно α и называемый еще первым коэффициентом ударной ионизации Таунсенда, определяется по увеличению тока в промежутке между электродами в результате ионизации молекул газа при столкновениях с электронами. Процесс ионизации ведет к образованию новых свободных электронов. Эти свободные электроны, в свою очередь, приобретают энергию поля, достаточную для ионизации, то есть для образования новых электронов. Ток, протекающий в промежутке с однородным полем, возрастает и дается выражением

$$i = i_0 \exp(\alpha d), \quad (1.7)$$

где d – длина промежутка (в сантиметрах), а i_0 – начальное значение тока.

Так как ионизация происходит при энергии электрона $W \geq W_{\text{и}}$, а энергия, приобретаемая электроном, зависит от поля и от длины пути свободного пробега, определяемой плотностью газа, то и вероятность ионизации, а следовательно и коэффициент α должны зависеть от поля и от концентрации молекул газа n или его давления p . Эксперименты подтверждают, что действительно имеется зависимость $\alpha/n = f(E/n)$ или $\alpha/p = f(E/p)$, причем при давлениях газа порядка атмосферного эта зависимость хорошо описывается уравнением вида

$$\alpha/N = A \exp[B/(E/N)], \quad (1.8)$$

где A и B – константы, зависящие от газа.

На рис. 1.2 приведена экспериментальная зависимость $\alpha/n = f(E/n)$ для воздуха. Отношение E/n часто называют приведенной напряженностью поля.

Как видно по рисунку, возрастание α/n с ростом приведенной напряженности E/n становится менее интенсивным, что связано с двумя факторами: если увеличение E/n происходит за счет роста напряженности поля E при неизменной плотности газа n , то с возрастанием энергии свободных электронов при их движении, уменьшается время взаимодействия при их столкновениях с молекулами, что приводит к уменьшению скорости роста вероятности ионизации; если рост E/n связан с уменьшением n , то уменьшается число молекул, с которыми сталкивается электрон, а, следовательно, уменьшается и число столкновений, что означает изменение α .

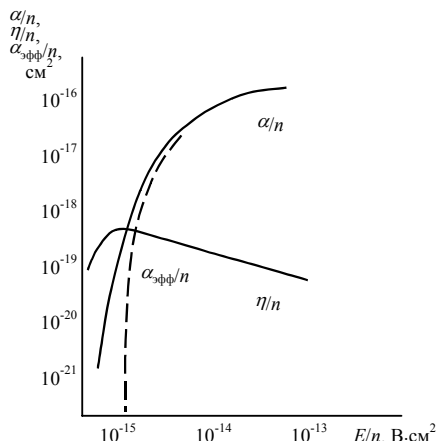
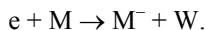


Рис. 1.2. Зависимости коэффициентов ионизации и прилипания и эффективного коэффициента ионизации в воздухе от E/n

1.5. Коэффициент прилипания. Эффективный коэффициент ионизации

Уравнение (1.8) соответствует процессам ионизации, происходящим в электроположительных газах, таких как He, Ar, Ne, H₂, N₂. В газах, в состав молекулы которых входят атомы кислорода, фтора и ряда других, при столкновении электрона с молекулой или атомом может происходить процесс захвата электрона с образованием отрицательного иона.



Устойчивость образовавшихся отрицательных ионов зависит от энергии сродства атома или молекулы к электрону W_p , то есть от энергии, выделяющейся при захвате электрона. Эта энергия должна быть положительной, то есть должна выделяться. Такие газы называются электроотрицательными, а процесс образования отрицательного иона при столкновении электрона с молекулой, – процессом прилипания, характеризуемым коэффициентом η , равным числу прилипаний, происходящих на пути в 1 см вдоль поля. Как и для α , для коэффициента прилипания существует зависимость $\eta/p = f(E/p)$ или $\eta/n = f(E/n)$ (рис. 1.2).

Если часть свободных электронов прилипает к молекулам газа, то число электронов, способных продолжать ударную ионизацию, сокращается, что учитывается введением так называемого эффективного коэффициента ионизации $\alpha_{эфф} = \alpha - \eta$. На рис. 1.2 приведена зависимость $\alpha_{эфф}/n = f(E/n)$ для воздуха. Значения $\alpha_{эфф}/n$ становятся положительными после некоторого порога при котором число ионизаций равно числу прилипаний. Для воздуха это пороговое значение приведенной напряженности равно примерно $E/n = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, что для атмосферного давления составляет $E = 24,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}$.

Особенностью отрицательных ионов является их нестабильность в сильных электрических полях, когда при столкновениях с электронами, ионами и даже нейтральными молекулами происходит отрыв электрона от отрицательного иона с образованием нейтральной молекулы и свободного электрона, так как в этом случае сообщаемая отрицательному иону энергия превышает энергию сродства. Для воздуха порогом распада отрицательных ионов можно считать напряженность поля, превышающую 30 кВ/см.

1.6. Процессы возбуждения

Среди процессов неупругого столкновения электронов с молекулами газа имеется большое число видов столкновения, при которых не образуются новые электроны, но которые имеют очень важное значение для развития разряда, так как при этих столкновениях электроны теряют энергию и уменьшается вероятность ионизации. Такими процессами является возбуждение атомов или молекул.

При неупругих столкновениях с электронами атомы или молекулы могут переходить из основного состояния в более высокое энергетическое состояние, что и соответствует процессу возбуждения. Основное состояние характеризуется наименьшей полной энергией атома или молекулы и является единственным стабильным состоянием. Атом, возбужденный в результате получения энергии, стремится вернуться в исходное состояние, при этом излучается фотон с энергией, зависящей от уровня возбуждения.

Если в атоме при получении им энергии возбуждения осуществляются только электронные переходы, что соответствует *электронному возбуждению*, то молекулы имеют еще и другие возможности восприятия передаваемой им энергии. Возникает либо вращение молекулы в целом вокруг некоторой оси, либо составляющие ее атомы начинают колебаться по отношению друг к другу; таким процессам соответствуют *вращательное и колебательное возбуждения*. Пороговые энергии возбуждения колебательных и вращательных уровней молекул очень малы: например для азота $W_k = 0,29 \text{ эВ}$, а для кислорода $W_k = 0,19 \text{ эВ}$.

При возвращении колебательно возбужденных молекул в основное состояние большая часть энергии излучения поглощается газом и переходит в тепловую энергию нейтральных молекул.

Для электронного возбуждения атомов и молекул в газах типа воздуха характерная пороговая энергия электронов, ниже которой возбуждение не происходит, составляет $6 \div 12 \text{ эВ}$.

1.7. Различные виды ионизации в газах

Ударная ионизация в газе, характеризуемая коэффициентом ионизации α , является в электрическом поле основным поставщиком свободных электронов. Вместе с тем на условия развития разряда могут оказывать влияние и даже стать определяющими и другие механизмы ионизации молекул и атомов. К их числу относятся фотоионизация и термоионизация.

Источником ионизирующего излучения может быть внешнее излучение, но таким источником может быть и сам газовый разряд, в котором фотоны образуются при возвращении в исходное состояние возбужденных атомов и молекул. Возникающие фотоны поглощаются газом, причем механизм фотопоглощения чрезвычайно разнообразен и зависит от энергии фотона и структуры молекулы.

Наибольшее практическое значение для развития разряда имеет поглощение фотона с последующей ионизацией молекулы – *фотоионизация*. Для осуществления фотоионизации нужно, чтобы энергия фотона $h\nu \geq W_{\text{и}}$. Молекулярные газы для фотоионизации требуют ультрафиолетового или мягкого рентгеновского излучения. При ультрафиолетовом излучении атом ионизируется путем выбивания одного из самых внешних электронов. Рентгеновское излучение взаимодействует преимущественно с более сильно связанными внутренними электронами.

Если в газе имеются молекулы разных сортов, отличающиеся разными значениями энергий ионизации и возбуждения, и если энергия электронного возбуждения одних молекул больше энергии ионизации других, то при девозбуждении молекул одного сорта может происходить фотоионизация молекул другого сорта, что имеет место, например, в воздухе при развитии разряда.

При повышении температуры газа до нескольких тысяч градусов возможно осуществление целого ряда реакций, в результате которых образуются положительные ионы и электроны. При высокой температуре за счет большой кинетической энергии частиц возможны неупругие столкновения между собой нейтральных молекул, которые приводят к возбуждению и диссоциации сталкивающихся частиц. В последнем случае молекула распадается на составляющие ее атомы или группы атомов, причем продукты диссоциации, обладающие чаще всего более низкими энергиями ионизации, чем сложная молекула, претерпевают ионизацию при последующих столкновениях.

В смесях газов, таких как воздух, при возвращении термически возбужденных молекул одного сорта (азота) в основное состояние происходит излучение с последующим поглощением фотонов молекулами другого сорта (кислорода), в результате чего также может быть ионизация. Таким образом под термической ионизацией понимается целая совокупность процессов, приводящих к ионизации при высокой температуре газа. Интенсивность термической ионизации характеризуют степенью ионизации m , равной отношению числа (концентрации) ионизованных частиц в единице объема газа $n_{\text{и}}$ к числу (концентрации) всех частиц в единице объема – n , так что $m = n_{\text{и}}/n$.

Если газ находится в условиях теплового равновесия, когда средняя тепловая энергия частиц разного сорта (нейтральных молекул, электронов, ионов) одинакова, то для определения степени ионизации m по известной температуре T можно пользоваться уравнением Саха:

$$p \left[\frac{m^2}{1 - m^2} \right] = AT^{2,5} \exp(W_{\text{и}}/kT), \quad (1.9)$$

где p – давление газа, мм рт.ст.; $W_{\text{и}}$ – энергия ионизации газа, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ/К; постоянная $A = 2,4 \cdot 10^{-4}$. Обычно даже при температурах порядка 10000 К степень ионизации газа еще очень мала и не превышает 0,1.

1.8. Диссоциация молекул

Еще одним видом неупругого столкновения электронов с молекулами газа является столкновение приводящее к диссоциации молекулы, при котором молекула распадается на отдельные атомы или группы атомов. В общем виде эта реакция записывается как



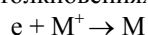
Этот процесс имеет большое значение как для развития разряда, так и при технологическом использовании электрических разрядов, когда в разряде получают частицы определенного сорта.

Энергии диссоциации молекул обычно выше энергии электронного возбуждения и ниже энергии ионизации молекулы. При столкновении электронов с молекулой с ее диссоциацией электрон теряет энергию, что препятствует его участию в ионизации и затрудняет развитие разряда, но продукты диссоциации могут принимать участие в цепочке последующих реакций, включая химические превращения, на которых и основывается электротехнология.

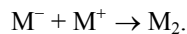
Вероятность прямого разбиения молекулы при столкновении с электроном очень мала, так как мало время передачи энергии от электрона молекуле и его недостаточно для ее разбиения на атомы и их ухода друг от друга. Обычно диссоциация идет двухступенчатым путем: сначала происходит возбуждение электронных состояний молекулы, а затем распад возбужденной молекулы на атомы.

1.9. Рекомбинация

Помимо ионизации, при которой возникают новые электроны и ионы, в ионизованном газе идет обратный процесс – воссоединение заряженных частиц при их столкновениях с образованием нейтральных молекул.



или



Этот процесс, называемый *рекомбинацией*, включает в себя большое число разных взаимодействий, приводящих к взаимной нейтрализации заряженных частиц.

Если взаимодействующие частицы – ионы, процесс называют ион-ионной рекомбинацией, если одна частица – электрон, а другая положительный ион, то это – электрон-ионная рекомбинация. В общем случае процесс взаимной нейтрализации характеризуют коэффициентом рекомбинации α_p , определяемым как число R актов рекомбинации в единице объема газа за единицу времени, при единичной концентрации частиц положительных и отрицательных, то есть

$$\alpha_p = R / (N^+ N^-). \quad (1.10)$$

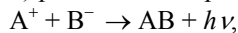
При рекомбинации противоположно заряженных частиц образующаяся нейтральная частица обладает энергией, меньшей полной внутренней энергии рекомбинирующих частиц, при этом избыток энергии W освобождается разным способом. Так при ион-ионной рекомбинации может быть:

а) трехчастичная рекомбинация



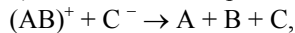
при которой в процессе взаимодействия участвует третья частица (заряженная или нейтральная), и избыток энергии передается ей. Этот вид рекомбинации наиболее существенен при давлениях порядка атмосферного, поскольку требуется достаточная плотность третьих частиц;

б) радиационная рекомбинация



сопровождающаяся излучением и преобладающая при низких давлениях, когда имеет место недостаток третьих частиц;

в) диссоциативная рекомбинация



имеющая место, если один или оба иона являются молекулярными, а избыток энергии идет на диссоциацию образующейся нейтральной молекулы.

При атмосферном давлении в воздухе коэффициент ион-ионной рекомбинации составляет $\alpha_p = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$.

Электрон-ионная рекомбинация имеет значительно меньшую вероятность из-за высокой скорости передвижения электронов, что ограничивает время взаимодействия частиц и время захвата электрона для образования нейтральной частицы.

1.10. Процессы вторичной ионизации

Для многих видов разряда пробой всего промежутка возможен только в том случае, если кроме ионизации в объеме газа, имеет место и так называемая вторичная ионизация на катоде, обеспечивающая воспроизводство заряженных частиц в связи с их уходом из промежутка. Процессы на катоде в промежутке при развитии разряда могут быть следующие:

а) освобождение вторичных электронов с катода под действием фотоизлучения;

б) освобождение электронов под действием прихода на катод положительных ионов;

в) освобождение электронов при взаимодействии с поверхностью катода возбужденных атомов и молекул.

Кроме того, может происходить освобождение электронов с поверхности электрода и в результате других процессов. Такими процессами являются:

а) автоэлектронная эмиссия, если напряженность электрического поля у поверхности электрода очень велика и происходит вырыв электрона из металла;

б) термоэлектронная эмиссия, происходящая при специальном нагреве электрода, например, в газоразрядных приборах.

Процессы освобождения электронов с катода под действием других частиц (ионов, возбужденных атомов, фотонов) называют процессами вторичной ионизации на катоде, интенсивность которых характеризуют коэффициентом γ , равным отношению числа электронов, освобожденных с катода, к числу взаимодействующих с катодом частиц. В зависимости от рода взаимодействующих частиц различают γ_i , γ_b , γ_ϕ . При воздействии на катод разных частиц суммарный коэффициент вторичной ионизации на катода

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_b + \gamma_\phi. \quad (1.11)$$

Помимо процессов на катоде, вторичная ионизация может происходить и в объеме газа. В определенном смысле такой вторичной ионизацией является рассмотренная ранее фотоионизация в объеме газа, так как в отличие от ударной ионизации при столкновении молекул с электронами, ионизация при поглощении фотона является вторичным процессом, следующим за образованием при столкновении возбужденной частицы и последующим испусканием фотона при девозбуждении.

Вторичная ионизация на аноде при взаимодействии с ним электронов или отрицательных ионов не имеет значения при рассмотрении процессов разряда, так как освободившиеся с поверхности анода электроны тут же вновь уходят на него.

10. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ЗАРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

10.1. Основные понятия

Статическая электризация – это процессы, которые приводят к образованию, разделению и накоплению зарядов разных знаков. Такие взаимодействия стали привлекать внимание очень давно, но в последнее время это стало особенно актуальным, так как в промышленности стали применять материалы с высоким удельным объемным сопротивлением $\rho_v \approx 10^{12}$ Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s \approx 10^{12}$ Ом. Эти материалы могут сохранять заряд в течение длительного времени, а значит, может накапливаться заряд, который увеличивает напряженность электрического поля. При этом могут возникнуть условия удовлетворяющие возникновению самостоятельного разряда, а значит, может образоваться электрическая искра (пробой промежутка).

Статическая электризация, таким образом, может приводить к следующим последствиям:

- возникновение разрядов и опасность взрыва или пожара;
- электрический разряд не происходит, но образуется электрическое поле, которое может воздействовать на технологический процесс (в текстильной промышленности – распушение нитей в пучке до диаметра 1 м, что затрудняет процесс прядения, в полиграфии – слипание листов бумаги при печатании книг, что приводит к появлению брака);
- воздействие на организм человека как микроразрядов, так и электрических полей;
- использование зарядов статического электричества для реализации технологических процессов (зарядка в электросепарации, при нанесении порошковых полимерных покрытий и т.д.).
- Мы будем рассматривать опасные проявления статического электричества. Опасные условия создаются, если:
- в определенном месте происходило накопление заряда;
- заряды создают электрическое поле, достаточное для развития разряда;
- энергия, выделяемая в канале разряда, оказывается больше, чем минимально необходимая энергия для воспламенения среды.

Эти условия не всегда и не везде выполняются, но тем не менее во многих технологических процессах эта вероятность велика. Одним из таких процессов является перекачка нефти и нефтепродуктов по трубопроводам.

10.2. Статическое электричество при перекачке нефти по трубопроводам

10.2.1. Физика образования и накопления заряда

При соприкосновении двух тел, отличающихся фазовым состоянием, образуется двойной электрический слой.

Различают три причины образования двойного электрического слоя:

- 1) преимущественное перемещение носителей зарядов из одного тела в другое – диффузия;
- 2) на границе раздела имеют место абсорбционные процессы, когда заряды одной из фаз преимущественно оседают на поверхности другой фазы;
- 3) имеет место поляризация молекул хотя бы одной из фаз. Это приводит к поляризации молекул другой фазы.

Причем поляризация во второй фазе может быть размытой (диффузной).

Двойной электрический слой зависит от удельного сопротивления вещества. Чем больше сопротивление вещества, тем более размытым в глубину является второй электрический слой.

Если рассматривать перекачку нефти, то размытый второй электрический слой может уноситься перемещением нефти и накапливаться в бункере. Чем больше скорость перемещения нефти, тем больше электризация нефти.

Величина зарядов статического электричества существенно зависит от условий, в которых происходит электризация и, в частности, от того, что поверхности соприкасающихся тел могут быть «загрязнены» другими веществами. Поэтому основой количественного анализа является эксперимент или, в лучшем случае, расчетно-экспериментальные исследования.

10.2.2. Технологический процесс транспортировки нефти

Статическая зарядка топлив стала резко проявляться примерно с 60-х – 70-х годов, когда начало применяться чистое топливо для улучшения экономичности работы и ресурса двигателей. На рис.10.1 показана технологическая цепочка транспортировки нефти.

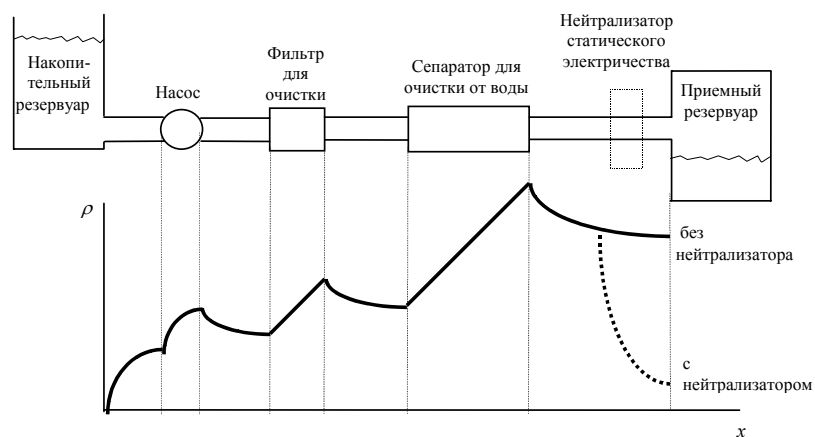


Рис.10.1. Нарастание плотности заряда в нефти при прохождении по тракту

Нарастание плотности заряда в нефти происходит в технологических устройствах, где осуществляется контакт нефти с материалами, приводящим к ее зарядке, и где увеличивается скорость течения нефти. Спад заряда наблюдается при движении нефти по заземленным трубопроводам.

При движении нефти по технологическому тракту вплоть до приемного резервуара опасности от накопления заряда статического электричества практически нет, так как воздушных промежутков в аппаратах здесь нет и нет возможности возникновения электрического пробоя в газе. Иная ситуация существует в приемном резервуаре, где обязательно наличие газового пространства над поверхностью нефти.

Заряд, накапливаемый в приемном резервуаре, можно определить из условия его увеличения за счет втекания в резервуар заряженной нефти с учетом релаксации (стекания) заряда на заземленные конструкции резервуара:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{общ}} = \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{вх}} + \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{релакс}}.$$

Здесь релаксация заряда происходит по экспоненциальной зависимости:

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau},$$

где $\tau = \varepsilon \varepsilon_0 / \gamma_v$ – постоянная времени релаксации, а ε и γ – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость нефти.

Отсюда:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{релакс}} = -\frac{Q_0}{\tau} e^{-t/\tau} = -\frac{Q}{\tau}.$$

Перепишем исходное уравнение, учитывая, что $\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}$, где $I_{\text{вх}}$ – ток зарядов статического электричества на входе в резервуар.

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{общ}} = I_{\text{вх}} - \frac{Q}{\tau}$$

Решением дифференциального уравнения является:

$$Q = I_{\text{вх}} \tau (1 - e^{-t/\tau}).$$

На рис. 10.2 приведены зависимости изменения плотности и суммарного объемного заряда нефти в приемном резервуаре.

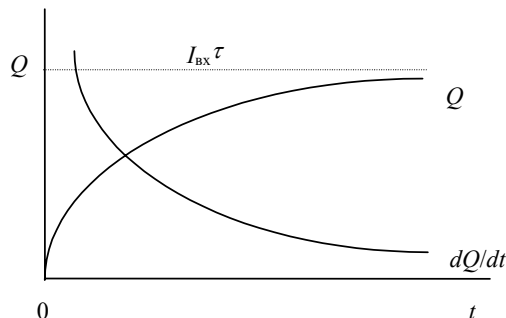


Рис. 10.2. Зависимость суммарного объемного заряда нефти в приемном резервуаре от времени наполнения

Из зависимостей видно, что скорость роста заряда экспоненциально падает, а суммарный объемный заряд, увеличиваясь, экспоненциально стремится к предельному значению, определяемому произведением $I_{\text{вх}} \tau$.

Поэтому для уменьшения заряда, накапливаемого в приемном резервуаре, есть два пути. Первый заключается в снижении постоянной времени релаксации путем добавления в нефть специальных присадок, увеличивающих ее проводимость. Данное направление выбрала голландская фирма «Shell». Недостатком метода является непрерывный контроль за количеством присадки в нефти и точная его дозировка, так как при очистке нефти фильтрами одновременно происходит удаление присадки.

Второй путь заключается в непосредственном уменьшении заряда, находящегося в приемном резервуаре. С этой целью используют специальные устройства, называемые нейтрализаторами статического электричества. Схема нейтрализатора статического электричества приведена на рис. 10.3.

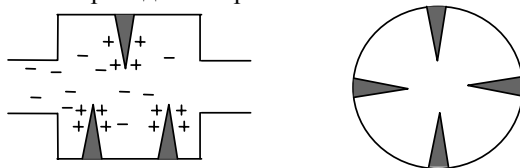


Рис. 10.3. Нейтрализатор статического электричества

Вокруг электродов, имеющих форму игл, в результате процессов ионизации образуются области с повышенным содержанием ионов, имеющих заряд противоположного знака избыточному заряду нефти (в нашем случае

положительных ионов). В результате рекомбинации отрицательных и положительных ионов избыточный заряд нефти уменьшается.

Для решения задачи по предотвращению возгорания паров нефти из-за разрядов статического электричества необходимо определить величину и распределение зарядов в приемном резервуаре в зависимости от параметров системы транспортировки, рассчитать распределение поля и определить возможность возникновения разрядов и воспламенения паров в зависимости от минимальной энергии, необходимой для воспламенения. Если вероятность воспламенения велика, то должны использоваться нейтрализаторы или вводиться ограничения на режимы перекачки (например, ограничения скорости перекачки). Опасность возникновения разрядов статического электричества зависит от размера и формы используемых резервуаров (рис. 10.4).

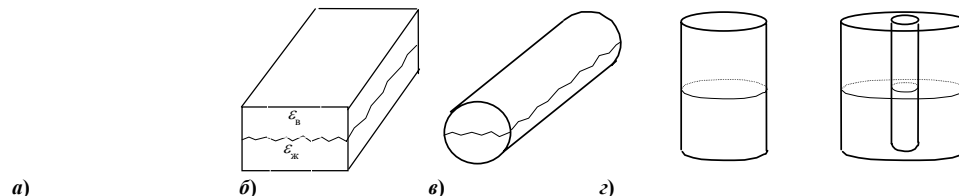


Рис. 10.4. Виды резервуаров
а) прямоугольный; б) горизонтальный цилиндрический; в) вертикальный цилиндрический; г) вертикальный цилиндрический с центральной стойкой

10.2.3. Воспламенение паров нефти

Заряд нефти, поступающей в резервуар, распределен по объему неравномерно. Это связано с релаксацией заряда на заземленные стенки конструкции. Поэтому, чем дальше рассматриваемый объем нефти от стенки резервуара, тем больше заряд в объеме. Кроме того, на поверхности нефти заряд релаксирует медленнее (особенно при приближении уровня к верхней стенке резервуара) в связи с влиянием большой величины емкости между поверхностью нефти и верхней стенкой.

Это означает, что на поверхности нефти в наиболее удаленной точке от стенок резервуара накапливается большой заряд, который создает электрическое поле между этой точкой поверхности нефти и заземленными стенками резервуара. По мере накопления заряда растет напряженность электрического поля вплоть до значения равного величине, при которой начинается разряд. В развивающемся разряде выделяется энергия, накопленная в нефти. Для того, чтобы пары нефти воспламенились, необходима определенная энергия равная минимальной энергии воспламенения. Для разных веществ она различается:

Минимальная энергия воспламенения паро-воздушных и кислородных (в скобках) смесей (мДж)

Ацетилен	0,011 (0,0002)	Метан	0,29 (0,0027)
Ацетон	0,25	Пентан	0,18
Бензин Б-70	0,15-0,394	Толуол	0,60
Бензин "Калоша"	0,234-0,309	Пропан	0,25 (0,0021)
Водород	0,013	Топливо Т-1	0,202
Гексан	0,23	Сероуглерод	0,077
Гептан	0,24	Этан	0,24
Керосин	0,48	Этилен	0,1
		Этиловый спирт	0,14

Энергия, выделяющаяся при пробое газового промежутка, определяется по формуле:

$$W = \int U i dt ,$$

где соответственно U – напряжение на промежутке и i – ток, протекающий через промежуток.

Микроразряды статического электричества не приводят к сколь-нибудь заметному изменению напряжения из-за очень малой длительности самих разрядов и их малой энергии. Тогда приближенно можно считать, что $U \approx \text{const}$. Следовательно

$$W = U \int I dt = Uq ,$$

т.е. энергия пропорциональна величине заряда, протекающего через канал.

На рис. 10.5 показаны зависимости величины зарядов, приводящих к воспламенению паров нефтепродуктов, от диаметра заземленного шара при положительном и отрицательном зарядах статического электричества.

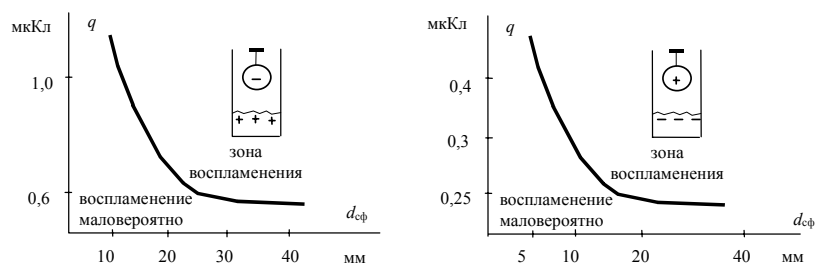


Рис.10.5. Воспламеняющие способности разрядов в зависимости от диаметра заземленного шара

Воспламеняющую способность разрядов статического электричества обычно определяют, помещая заземленный сферический электрод вблизи поверхности жидкости. Видно, что воспламеняющая способность разрядов резко снижается, если диаметр сферы становится меньше 20 мм. Наименьшее значение воспламеняющего заряда соответствует электроду диаметром 20÷30 мм. При отрицательной полярности заряда нефти и нефтепродукта энергия воспламенения ниже, чем при положительной. В табл. 10.1 представлены параметры групп топлив по воспламеняемости.

Таблица 10.1

Группы топлив по уровню воспламеняемости

Группы топлив	Температ. вспышки	Вероятн. образован. горючей смеси	Допустим. вероятн. воспламенения	Топливо "+"		Топливо "-"	
				q , мкКл	$U_{\text{доп.}}$, кВ	q , мкКл	$U_{\text{доп.}}$, кВ
I	>50	0	1	не огр.	не огр.	не огр.	не огр.
II	35÷50	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	<0,31	<84	<0,07	<31
III	20÷35	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	<0,20	<60	<0,046	<27
IV	18÷20	0,95	10^{-7}	<0,16	<54	<0,04	<25

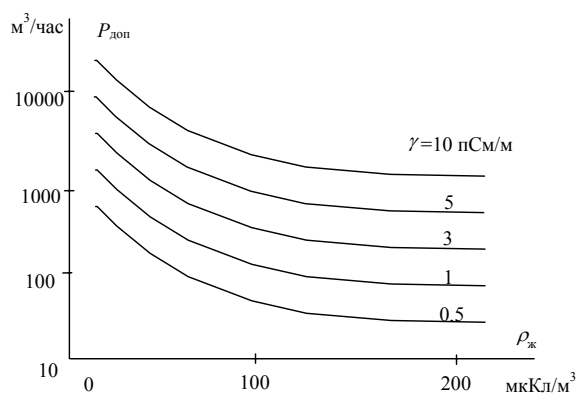


Рис. 10.6. Зависимость допустимой скорости перекачивания нефтепродуктов от накапливаемого удельного заряда и проводимости нефтепродуктов

Исследования показали, что процесс заполнения резервуара является безопасным, если потенциал на поверхности жидкости не больше 25 кВ для "-" заряженного топлива и не больше 54 кВ – для "+" заряженного топлива.

Исходя из режимов работы перекачивающих нефтепродукты систем и условий их безопасной работы, определяется допустимая производительность при накоплении определенного заряда в нефтепродуктах (рис. 10.6).

10.3. Методы измерения основных параметров, характеризующих статическую электризацию

Все теоретические рассуждения из-за множества влияющих неопределенных факторов дают только качественное представление. Для количественной оценки статической опасности электризации необходимы экспериментальные исследования в данных условиях. Разработаны соответствующие методики.

10.3.1. Измерение токов электризации

а) Для жидких и сыпучих диэлектриков измерение токов осуществляют путем секционирования и изолирования отдельных секций трубопроводов и оборудования (рис. 10.7).

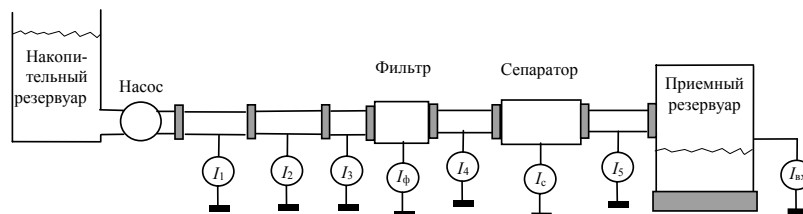


Рис. 10.7. Измерение токов электризации для жидких и сыпучих материалов

Суммарный входной ток в резервуар является суммой токов электризации:

$$I_{\text{вх}} = I_1 + I_2 + I_3 + I_{\text{ф}} + I_4 + I_5.$$

б) При движении диэлектрических нитей или лент измеряется ток, протекающий в цепи заземления элементов устройств, при трении о которые происходит электризация материалов (рис.10.8).

В пределе плотность заряда на изолированной ленте может достигать величины $\sigma_{\text{max}} = 26,5 \text{ мкКл/м}^2$, которые удастся нанести на изолированную ленту. Если плотность заряда превышает это значение, то напряженность электрического поля оказывается достаточной для возникновения электрических разрядов, которые эти заряды нейтрализуют. Практически удастся получить заряд с $\sigma_{\text{практ}} = 12 \text{ мкКл/м}^2$.

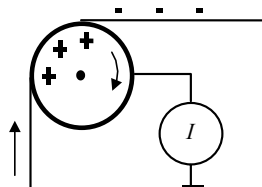


Рис. 10.8. Электризация нитей и лент

10.3.2. Измерение параметров зарядов и напряженности поля

1) Использование зондов.

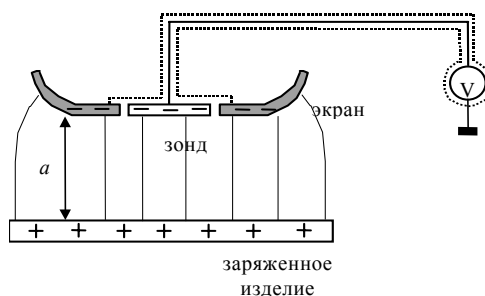


Рис. 10.9. Измерение заряда с помощью зонда

В качестве зонда обычно используется металлический диск небольшого размера, располагаемый параллельно поверхности заряженного изделия (рис. 10.9). Зонд окружен заземленным экраном, чтобы исключить искажение поля на краях зонда. Тогда можно четко определить часть поверхности изделия, заряд которой за счет электростатической индукции наводит заряд на зонде. Она равна площади поверхности зонда.

Если U – потенциал зонда, измеренный вольтметром, то наведенный на зонде заряд будет равен

$$q_{\text{нав}} = C_3 U,$$

где C_3 – емкость зонда.

Соответственно, плотность заряда на изделии будет равна

$$\sigma = q_{\text{нав}} / S_3,$$

где S_3 – площадь поверхности зонда.

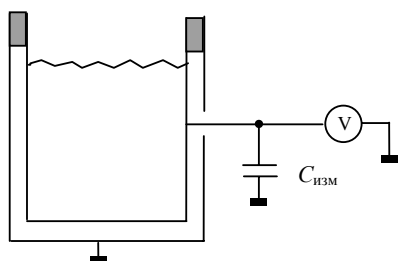


Рис. 10.10. Измерение заряда с помощью «клетки Фарадея»

По измеренной плотности заряда можно определить напряженность поля у поверхности изделия.

$$E = \sigma / \epsilon_0.$$

С помощью зондов можно измерять напряженность электрического поля $U = Ea$, где a – расстояние от датчика до наэлектризованной поверхности, а также плотность заряда $\sigma = \epsilon_0 E$.

2) Использование «клетки Фарадея» (рис. 10.10).

Для измерения заряда наэлектризованной жидкости или сыпучего материала, в особенности в тех случаях, когда трубопровод или резервуар нельзя изолировать от земли, определенный объем этой жидкости или сыпучего материала помещают в изолированную банку или сосуд и измеряют потенциал этого сосуда относительно заземленного экрана (рис. 10.10).

Заряд пробы равен

$$q = CU,$$

где C – емкость между сосудом и заземляющим экраном. Плотность объемного заряда будет равна

$$\rho = \frac{q}{V_{\text{проб}}},$$

где $V_{\text{проб}}$ – объем жидкости или сыпучего материала.

3) Использование флюксометров.

Схема флюксометра приведена на рис.10.11. Прибор состоит из неподвижного измерительного электрода, на котором наводится индуцируемый внешним электрическим полем заряд, и вращающегося электрода. Вращающийся электрод периодически перекрывает измерительный электрод от действия внешнего поля. Когда измерительный электрод открыт, на нем наводится заряд, когда он закрыт, то заряд стекает. Амплитуда тока пропорциональна напряжению поля. Ток усиливается с помощью усилителя и подается на регистрирующий прибор. Градуировка флюксометров производится в однородном постоянном электрическом поле:

$$E = U/H,$$

где H – расстояние между флюксометром и электродом, создающим внешнее поле.

Флюксометры используют для измерения напряженности поля в танкерах, в емкостях сыпучих материалов, вблизи поверхности пленки и т.д.

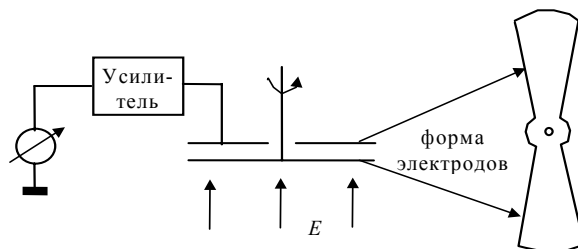


Рис. 10.11. Измерение напряженности электрического поля с помощью флюксометров

10.4. Способы защиты от разрядов статического электричества

Способы защиты:

– предотвращение накопления зарядов статического электричества путем увеличения проводимости материалов (присадки, влажность),

– нейтрализация зарядов статического электричества с помощью специальных устройств.

1. Заземление.

Заземление не является защитой от зарядов статического электричества, но оно необходимо для ограничения предельного заряда, который может накапливаться на изоляционных материалах и передаваться на проводящие конструкции установок. Для статического электричества заземленным считается объект, который имеет сопротивление $R_{\text{заземл.}} < 10^7$ Ом при относительной влажности меньше 60%.

Постоянная времени стекания заряда с объекта $\tau = RC$ должна быть достаточно малой и составлять: $\tau = 10^{-1}$ с – для невзрывоопасных помещений, $\tau = 10^{-3}$ с – для взрывоопасных помещений.

2. Увеличение проводимости диэлектрических материалов.

1) Использование поверхности активных веществ – ПАВ. Диэлектрические вещества покрывают пленкой ПАВов, имеющих высокую проводимость. Недостатком является ухудшение действия ПАВов со временем.

2) Антистатические присадки, добавляемые в диэлектрические вещества и влияющие на их объемную проводимость. Добавляются в жидкие топлива, могут добавляться и в твердые материалы. Например, в полиэтилен добавляют сажу. Недостатком является влияние присадок на структуру веществ, ухудшая их качество.

3) Увлажнение воздуха. Наличие паров воды в воздухе более 70% приводит к быстрому стеканию зарядов статического электричества, благодаря появлению пленки влаги на поверхности.

3. Применение нейтрализаторов зарядов статического электричества.

1) Индукционные (пассивные) нейтрализаторы.

Индукционные (пассивные) нейтрализаторы (рис. 10.12.) представляют собой заземленный электрод в виде одной или ряда игл, размещенный

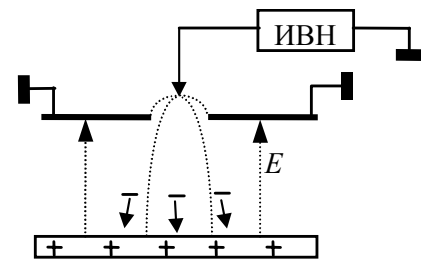


Рис. 10.13. Схема активного нейтрализатора

над заряженной поверхностью изделия. Электрическое поле создается между заряженным изделием и заземленным коронирующим электродом. Ионы коронного разряда под действием электрического поля движутся к заряженной поверхности изделия и разряжают ее.

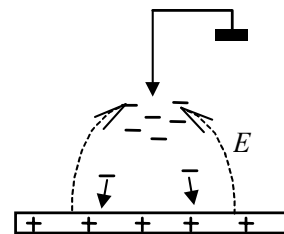


Рис. 10.12. Схема пассивного нейтрализатора

Недостатком является невозможность полного снятия заряда с изделия. Это связано с необходимостью некоторого «избыточного» заряда на изделии позволяющего получить напряженность превышающую напряженность, при которой возникает коронный разряд.

2) Высоковольтные (активные) нейтрализаторы.

В нейтрализаторах данного типа на коронирующий высоковольтный электрод подают потенциал от источника высокого напряжения (рис. 10.13.).

В этой связи нейтрализаторы получили название – активные. Наличие высоковольтного источника обеспечивает устойчивую генерацию ионов независимо от наличия зарядов на изделии. Коронный разряд может создаваться между игольчатым электродом и некоронирующим заземленным электродом, выполненным в виде кольца, в отверстии

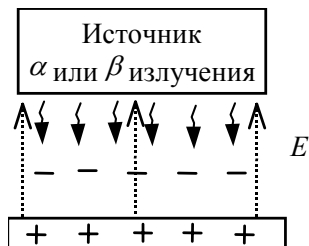


Рис. 10.14. Схема радиоактивного

которого размещается коронирующий электрод. Если необходимо снимать заряды определенного знака, то применяют источники постоянного напряжения. Для снятия любых знаков заряда на изделии используют источники переменного напряжения. Поступление ионов к поверхности изделия обеспечивается за счет поля зарядов статического электричества.

3) Радиоактивные нейтрализаторы.

Ионизация молекул воздуха с образованием "+" и "-" ионов происходит за счет энергии радиоактивного α или ρ излучения (рис. 10.14.). В зависимости от знака заряда на изделии под действием электрического поля, создаваемого этим зарядом, к поверхности изделия движутся ионы противоположного знака. Недостатком радиоактивных нейтрализаторов является малый ионизационный ток по сравнению с

другими нейтрализаторами.

4) Комбинированные нейтрализаторы – представляют собой комбинацию радиоактивных и пассивных нейтрализаторов.

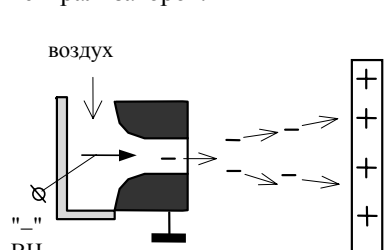


Рис. 10.15. Схема аэродинамического нейтрализатора

5) Аэродинамические нейтрализаторы.

Ионы, образуемые в поле коронного разряда, создаваемого в камере, выносятся в область изделия потоком воздуха (рис. 10.15.). Данный тип нейтрализаторов находит применение в тех случаях, когда недопустимо воздействие на изделие световым излучением коронного разряда или потоком радиоактивного излучения, например, нейтрализация зарядов при производстве фотопленок и фотобумаг.

Эффективность нейтрализаторов η может быть записана в следующем виде

$$\eta = \left(1 - \left| \frac{\sigma_{\text{ост}}}{\sigma_{\text{н}}} \right| \right) \cdot 100 \%,$$

где $\sigma_{\text{н}}$ и $\sigma_{\text{ост}}$ – начальная и остаточная плотность зарядов статического электричества.

Нейтрализатор, полностью устраняющий электризацию ($\sigma = 0$), обладает эффективностью $\eta = 100 \%$. Если происходит частичная нейтрализация заряда ($\sigma_{\text{ост}}/\sigma_{\text{нач}} > 0$) или перезарядка ($\sigma_{\text{ост}}/\sigma_{\text{нач}} < 0$), то $\eta < 100 \%$.

В динамическом режиме, когда происходит непрерывная генерация зарядов статического электричества на поверхности наэлектризованного материала $\sigma_{\text{н}}$, то эквивалентная плотность тока на единицу длины, созданная зарядами статического электричества при их перемещении со скоростью V равна

$$J_{\text{нач}} = \sigma_{\text{н}} V,$$

Тогда эффективность работы нейтрализатора определяется по выражению

$$\eta = J_{\text{нейтр}} / J_{\text{нач}},$$

где $J_{\text{нейтр}}$ – плотность тока нейтрализатора на единицу длины, определенная из вольт-амперной характеристики.

Вольт-амперные характеристики нейтрализаторов различных типов приведены на рис. 10.16. Из характеристик

следует, что наиболее эффективными являются нейтрализаторы постоянного тока, затем индукционный и переменного тока, и наконец, радиоактивные.

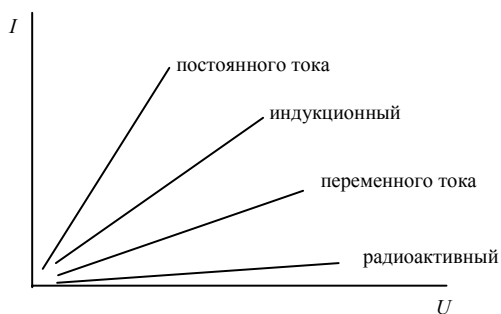


Рис. 10.16. Вольт-амперные характеристики нейтрализаторов статического электричества

2. ФИЗИКА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

2.1. Развитие разряда в однородном поле при постоянном напряжении

Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.

Разряд в газе начинается с того, что свободные электроны, всегда в некотором количестве имеющиеся в газе, под действием приложенного напряжения приобретают энергию достаточную для ударной ионизации. Если при столкновении электрона с нейтральной молекулой происходит ионизация, то образуется еще один электрон, который так же может ионизовать, и процесс приобретает лавинный характер.

Действительно, пусть n – концентрация электронов. Тогда на пути dx в электрическом поле в результате ионизации образуется dn новых электронов

$$dn = n\alpha dx. \quad (2.1)$$

Общее число электронов в лавине на пути dx получается интегрированием (2.1):

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha dx \text{ или } n = n_0 e^{\alpha x}, \quad (2.2)$$

где n_0 – начальная концентрация электронов.

Выражение (2.2) справедливо в однородном электрическом поле. В неоднородном поле, в котором напряженность в промежутке меняется по пути движения лавины,

$$n = n_0 \exp \int_0^d \alpha dx.$$

При ионизации образуются не только электроны, но и положительные ионы, обладающие малой по сравнению с электронами подвижностью, поэтому по мере движения лавины к аноду в ней происходит процесс разделения зарядов. Электроны уходят на анод, а положительные ионы, подходя к катоду, создают там новые электроны за счет вторичной ионизации. Эти вторичные электроны также могут создавать лавины. Если интенсивность вторичной ионизации слабая и для поддержания воспроизводства электронов требуется действие внешнего ионизатора, то такой разряд называется *несамостоятельным*.

В случае, если процессы ионизации развиваются и при прекращении действия внешнего ионизатора, то образуется *самостоятельный разряд*.

Условие перехода разряда в самостоятельный процесс носит название условия самостоятельности разряда Таунсенда и может быть пояснено следующим образом.

Пусть в результате процессов ударной ионизации в промежутке между электродами формируется лавина электронов, которые под действием поля движутся к аноду. Соответственно положительные ионы движутся к катоду и выбивают вторичные электроны.

Для того, чтобы разряд поддерживался без действия внешнего ионизатора, нужно, чтобы процессы вторичной ионизации, сопровождающие прохождение лавин, обеспечивали возникновение новых лавин. Это означает, что каждая лавина начинающаяся с одного электрона должна обеспечить возникновение хотя бы одного вторичного электрона, дающего начало новой лавине.

Если коэффициент γ дает число электронов выбиваемых из катода одним положительным ионом, то величина $\gamma[\exp(\alpha d) - 1]$, где d – межэлектродное расстояние, обозначает число вторичных электронов образовавшихся в результате прохождения единичной первичной лавины. Так как первичная лавина началась с одного электрона, то для воспроизводства лавин число вторичных электронов должно быть не меньше единицы. Таким образом условие самостоятельности разряда имеет вид

$$\gamma[\exp(\alpha d) - 1] \geq 1. \quad (2.3)$$

Так как обычно $\exp(\alpha d) \gg 1$, то (2.3) можно упростить:

$$\gamma \exp(\alpha d) \geq 1 \text{ или } \alpha d \geq \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right).$$

Так как на катод приходят и выбивают вторичные электроны не только положительные ионы, но и возбужденные метастабильные молекулы и фотоны, то в (2.3) под γ понимаются все процессы образования вторичных электронов на катоде. В более общем случае вторичная ионизация должна учитывать и процессы в объеме газа, такие как, например, фотоионизация в объеме. Тогда уравнение (2.3) принимает более универсальную форму, применимую и в случае, когда процессы на катоде вообще не принимают участия в развитии разряда, как это имеет место в резко-неоднородных полях.

Искровой разряд. Закон Пашена.

При $\gamma \exp(\alpha d) \geq 1$ ионизация, вызываемая последовательными лавинами, носит нарастающий характер, ток возрастает, что приводит к образованию **искрового разряда**, или **искрового пробоя**, при котором возникает тонкий проводящий канал, замыкающий промежуток. Напряжение, при котором для однородного поля выполняется условие (2.3), носит название *пробивного напряжения*. Так как и α/p , и γ зависят от напряженности поля E/p , а напряженность определяется приложенным напряжением U и длиной разрядного промежутка d , то для однородного поля можно вывести уравнение зависимости пробивного напряжения от произведения pd вида $U_{пр} = f(pd)$, которое носит название *закона Пашена*.

$$U_{пр} = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln \frac{1}{\gamma}}\right)} \quad (2.4)$$

где A и B – постоянные, характеризующие газ.

Эксперименты для разных газов дают хорошее совпадение с такой зависимостью.

В полном соответствии с этой формулой и экспериментальными данными получено простое уравнение для расчета пробивного напряжения в воздухе при давлении, близком атмосферному

$$U_{\text{пр}} = 24,5pd + 6,4(pd)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

где p – давление газа, атм; d – расстояние между электродами, см; U – в кВ.

Зависимость для воздуха, соответствующая (2.4) и (2.5) приведена на рис. 2.1.

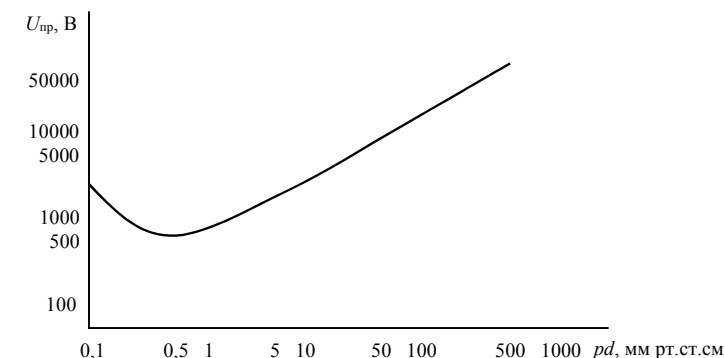


Рис. 2.1. Зависимость пробивного напряжения в воздухе в однородном поле от произведения pd (закон Пашена)

При большой мощности источника напряжения, по каналу искры начинает протекать большой ток, что приводит к разогреву канала и возникновению в нем термической ионизации. Сопротивление канала резко падает, ток еще более возрастает, и возникает **дуговой разряд**, при котором ток может превышать сотни ампер.

2.2. Развитие разряда в резко-неоднородных полях

Резко-неоднородное поле характерно для промежутков, создаваемых электродами типа игла–плоскость, провод–плоскость, а также стержень–плоскость или шар–плоскость при малом радиусе закругления шара и большом расстоянии между электродами. Особенностью резко-неоднородных полей являются высокие напряженности поля у электрода с малым радиусом закругления даже при сравнительно небольшом напряжении на промежутке. Это означает, что в этой области могут идти процессы ударной ионизации, возникают лавины электронов, и условие самостоятельности разряда выполняется, когда зона ионизации охватывает только малую часть промежутка. Соответствующее значение напряжения (U_0) носит название **начального напряжения зажигания разряда**.

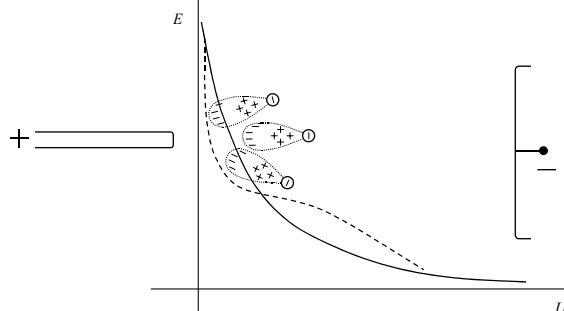


Рис. 2.2. Искажения внешнего поля объемным зарядом лавин при положительном напряжении на стержне в промежутке стержень–плоскость

— напряженность неискаженного поля
 --- суммарная напряженность поля

При высоких значениях приложенного напряжения разряд в промежутке около электрода с малым радиусом кривизны проходит несколько стадий. Сначала возникают лавины, которые в зависимости от направления поля (в зависимости от полярности электрода) развиваются к электроду или от него. В результате разделения зарядов в лавинах, около электрода образуется избыточный объемный заряд одного знака, который создает собственное поле (рис.2.2), снижающее поле у электрода (эффект экранирования) и резко усиливающее поле в промежутке перед зарядом.

Если объемный заряд достигает некоторого критического значения, созданное им поле оказывается соизмеримым с внешним полем, при этом перед объемным зарядом напряженность может достигать сотни кВ/см, что обеспечивает там интенсивную ударную ионизацию и создание нового избыточного заряда. Процесс повторяется, и происходит возникновение новой стадии разряда – **стримерной**, при которой образуются светящиеся каналы, называемые стримерами. Эксперименты показывают, что стример представляет собой тонкий канал частично ионизованного газа, на переднем конце которого расположен избыточный заряд высокой концентрации, называемый

головкой стримера. В поле этого заряда идет интенсивная ионизация, образуются лавины, что обеспечивает образование нового избыточного заряда и продвижение стримера в глубь промежутка в соответствии с направлением внешнего поля.

Оценки дают высокую концентрацию электронов в канале стримера $n_e = 10^{13} \div 10^{14} \text{ 1/см}^3$, при этом велика и концентрация положительных ионов, так что избыточный заряд в канале невелик, а средняя продольная напряженность поля в канале оценивается в $5 \div 7 \text{ кВ/см}$. Радиус канала стримера по разным оценкам составляет от 30 до 300 мкм.

В резко-неоднородном поле размеры области, занятой разрядом, могут быть меньше длины промежутка, и она располагается вблизи электрода с малым радиусом закругления. Такой разряд называется **коронным разрядом**. Если он ограничен только лавинной стадией, то это – *лавинная корона*, если переходит в стримерную стадию, то это – *стримерная корона*.

Возникновение коронного разряда еще не означает пробоя промежутка, так как разрядная зона занимает его малую часть. Коронный разряд возникает при начальном напряжении, при этом в резко-неоднородном поле начальное напряжение меньше, чем в однородном. В однородном и слабо-неоднородном полях возникновение разряда обязательно приводит к пробоему всего промежутка, и начальное напряжение равно пробивному. В резко-неоднородном поле может быть состояние, при котором стримеры достигают противоположного электрода, но пробоя промежутка не происходит, так как не происходит переход в искру. Для образования искры требуется повышение напряжения, чтобы хотя бы один из стримерных каналов превратился в искровой. В искровой стадии происходит резкое увеличение тока, сопровождающееся выделением тепла, газ в канале разогревается и начинается термическая ионизация. Все это соответствует *искровому пробоему* промежутка.

В общем случае поэтапное развитие разряда начиная с электрода с малым радиусом кривизны облегчает продвижение разряда по сравнению с равномерным полем. Поэтому разрядное напряжение промежутков с резко-неоднородным полем существенно меньше чем промежутков с однородным полем. Средняя пробивная напряженность для промежутков с резко-неоднородным полем составляет $5 \div 7 \text{ кВ/см}$.

Перечисленные стадии разряда могут иметь место в промежутках небольшой длины (от 1 до $40 \div 50 \text{ см}$) и при давлениях газа порядка атмосферного.

В так называемых длинных промежутках, длина которых 0,5 м и более, или при повышенных (более атмосферного) давлениях газа разряд из стримерной стадии может перейти в **лидерную** стадию, характеризующуюся образованием мощного ярко светящегося плазменного канала, внутри которого температура газа достигает тысяч градусов, идет термическая ионизация газа и по которому протекает ток в десятки и сотни ампер. При этом в отличие от искры лидер в зависимости от приложенного напряжения может пройти лишь часть промежутка или пересечь весь промежуток, осуществляя полный пробой с переходом в дугу.

2.3. Влияние формы воздействующего напряжения на развитие разряда

Рассмотренные выше стадии разряда осуществляются при воздействии на промежуток постоянного напряжения. Однако на практике, в особенности при работе электроэнергетических объектов, происходит воздействие на газовый промежуток переменного и импульсного напряжений, что вносит дополнительные особенности в развитие разряда.

В промежутках с однородным полем *разряд при переменном напряжении* происходит как и при постоянном напряжении при выполнении условия самостоятельности, и начальное напряжение равно пробивному. Однако значения пробивного напряжения, так называемая электрическая прочность промежутка, при переменном напряжении зависят от его частоты f . Вместе с тем, эксперименты показывают, что существует область частот от промышленной частоты $f = 50 \text{ Гц}$ до некоторой критической частоты, превышающей несколько килогерц, в пределах которой пробивное напряжение практически не зависит от частоты. Это связано с тем, что длительность полупериода воздействующего напряжения превышает время развития разряда, и разряд заканчивается до изменения полярности электрода.

Особый случай для развития разряда представляет воздействие на разрядный промежуток *импульсного напряжения*. Следует различать по длительности так называемые грозовые импульсы, коммутационные импульсы напряжения, соответствующие тем, что возникают при ударах молнии или при работе коммутирующей аппаратуры в электрических сетях, и наносекундные импульсы, которые находят применение в электротехнологиях.

Особенности развития разряда при импульсном воздействии напряжения определяются ограниченным временем роста напряжения до максимального значения и коротким временем воздействия напряжения. Для пробоя промежутка при импульсном напряжении требуется более интенсивное развитие ионизационных процессов, которые обеспечили бы время развития разряда, меньшее, чем время действия импульса. Время разряда, в свою очередь, складывается из *времени формирования разряда* от момента появления первых эффективных электронов, дающих начало образованию лавин, до пробоя промежутка и так называемого *статистического времени запаздывания разряда*, равного времени ожидания эффективных электронов, если начальная концентрация электронов оказывается недостаточной для интенсивной ионизации.

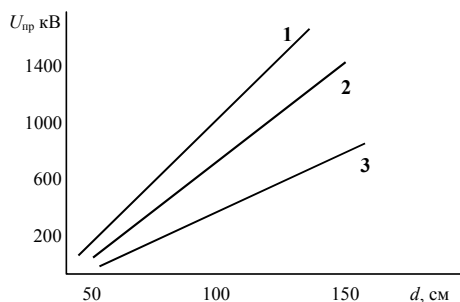


Рис. 2.3. Пробивные напряжения в воздухе в промежутке стержень–плоскость при импульсном воздействии
1 – отрицательное острие
2 – положительное острие
3 – пробивное напряжение при $f = 60 \text{ Гц}$

Из-за статистического запаздывания начала разряда начальное напряжение оказывается выше, чем при воздействии постоянного напряжения, причем это повышение также носит статистический характер и зависит от полярности высоковольтного электрода (рис.2.3).

При воздействии на промежуток импульсного напряжения наносекундной длительности, когда длительность фронта импульса напряжения составляет $10 \div 20$ нс, а длительность импульса – сотни наносекунд, для того, чтобы развитие разряда произошло за время действия импульса, напряжение должно быть резко увеличено. Это означает большую величину пробивного напряжения ($E_{\text{ср. разр.}} \geq 20$ кВ/см).

3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

3.1. Определение плазмы и ее основные свойства

Плазмой называют ионизованный газ, содержащий свободные положительно и отрицательно заряженные частицы, в котором суммарный заряд в каждой единице объема стремится к нулю, то есть плазма представляет собой электрически нейтральную среду.

В общем случае плазма может состоять из положительно заряженных ионов, отрицательно заряженных частиц – электронов и отрицательных ионов – и нейтральных частиц. Отношение числа электронов n_e (или ионов) в единице объема плазмы к полному числу частиц n в этом же объеме $m = n_e/n$ называют *степенью ионизации плазмы*. В предельном случае, когда число нейтральных частиц в плазме стремится к нулю, плазма называется *полностью ионизованной*, для которой $m \rightarrow 1$. В технических устройствах, как правило, имеют дело с неполностью или *частично ионизованной плазмой*, для которой $m \ll 1$.

Степень ионизации плазмы в зависимости от условий ее образования и существования может изменяться в широких пределах. Столб тлеющего разряда – это слабоионизованный газ со степенью ионизации порядка $10^{-8} \div 10^{-6}$. Положительный столб дугового разряда при атмосферном и более высоких давлениях имеет степень ионизации порядка $10^{-3} \div 10^{-1}$.

В соответствии с величиной концентрацией частиц может быть *разреженная* плазма, примером которой служит ионосфера Земли, в которой концентрация электронов составляет 10^5 1/см³, или плазма в столбе тлеющего разряда при низких давлениях газа, и *плотная плазма*, например, в канале лидера при разряде в длинных воздушных промежутках или в канале молнии, в котором концентрация электронов может достигать $(1 \div 5) \cdot 10^{17}$ 1/см³.

В зависимости от условий, в которых образована и находится плазма, различают *низкотемпературную* и *высокотемпературную плазму*. В низкотемпературной плазме температура близка к температуре окружающей среды и составляет порядка $300 \div 400$ К. В высокотемпературной плазме температура может достигать тысяч и сотен тысяч Кельвинов.

Основное свойство плазмы – стремление к электрической нейтральности – является следствием взаимодействия полей отдельных заряженных частиц. В плазме, являющейся смесью заряженных частиц разного знака, силы притяжения, действующие между разноименно заряженными частицами, уравниваются силами отталкивания одноименно заряженных частиц. Учитывая статистический характер распределения частиц в плазме, говорят не о полной электрической нейтральности, а о *квазинейтральности плазмы*. Квазинейтральность означает, что суммарный заряд каждой единицы объема плазмы $q = n_+ + n_- + n_e \rightarrow 0$.

В нейтральном газе мерой средней кинетической энергии хаотического движения частиц является температура газа T , определяемая из соотношения $1/2 m w^2 = 3/2 kT$, где m – масса частиц газа, w – средняя скорость их хаотического движения, k – постоянная Больцмана. Таким же образом характеризуют и среднюю энергию частиц плазмы.

В этом случае средняя энергия электронов и ионов может характеризоваться температурой соответственно T_e и $T_{\text{и}}$.

$$\begin{aligned} (m_e w_e^2)/2 &= 3/2 kT_e \\ (m_{\text{и}} w_{\text{и}}^2)/2 &= 3/2 kT_{\text{и}} \end{aligned}$$

В слабых электрических полях и в установившемся режиме средние энергии электронной и ионной составляющих плазмы равны между собой и равны средней энергии нейтральных частиц, что соответствует $T_e = T_{\text{и}} = T_{\text{газа}}$. Такое состояние означает *полное термодинамическое равновесие*, и плазма называется *равновесной*.

В сильных электрических полях энергия, приобретаемая электронами от поля, оказывается существенно больше энергии ионов из-за сильного различия в скоростях частиц. Энергия электронов при ограниченном времени взаимодействия не успевает выровняться с энергией ионов. Поэтому в такой плазме $T_e \gg T_{\text{и}} = T_{\text{газа}}$. Такое состояние характеризует *неравновесную плазму*.

Даже в неравновесной плазме, образующейся, например, в канале лидера, из-за отклонений в распределении плотности частиц могут образоваться области, в которых плазма близка равновесной. Такие области называют областями *локального (местного) термодинамического равновесия*.

3.2. Дебаевский радиус экранирования

Как уже сказано выше, основным свойством плазмы является стремление к электрической нейтральности. Однако в процессе хаотического движения частиц в плазме возможно временное отклонение от нейтральности в

отдельных областях, то есть происходит временное разделение зарядов в пространстве. Так же следует иметь в виду, что в общем случае заряды различного знака расположены на некотором расстоянии друг от друга.

Рассмотрим элемент структуры поля состоящий из некоторой заряженной частицы и объемного заряда, например, ионов противоположного знака, расположенных на некотором расстоянии (рис. 3.1). В целом система нейтральна и на удалении поле стремится к нулю. Однако вблизи заряженной частицы электростатическое поле от этой частицы преобладает. Только начиная с некоторого расстояния начинает проявляться действие зарядов противоположного знака, стремящихся уменьшить суммарное поле.

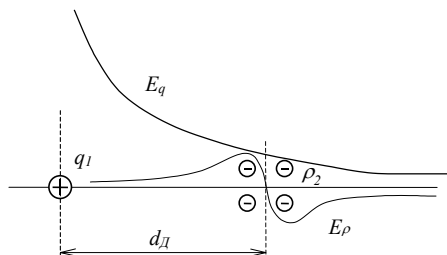


Рис. 3.1. К понятию о дебаевском радиусе

Характерное расстояние, на котором перестают проявляться неоднородности структуры поля квазинейтральной плазмы носит название **дебаевского радиуса экранирования**.

В равновесной плазме, где температуры электронной и ионной составляющих плазмы одинаковы ($T_e = T_+ = T_{\text{газа}}$) характерный радиус экранирования заряда равен

$$d = \sqrt{\frac{kT}{8\pi e^2 n_e}}.$$

В неравновесной плазме при $T_e \gg T_+ = T_{\text{газа}}$

$$d = \sqrt{\frac{kT}{4\pi e^2 n_e}}.$$

Дебаевский радиус связан с расстоянием, на которое возможно сильное разделение зарядов в плазме. Например, при $T_e = 1$ эВ и $n_e = 10^{14} \text{ 1/м}^3$ дебаевский радиус $d = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Часто ионизованный газ называют плазмой, если дебаевский радиус экранирования много меньше других характерных расстояний области, занятой плазмой.

3.3. Плазма в электрическом поле

Выше было рассмотрено движение в электрическом поле отдельных заряженных частиц. В отличие от такого случая движение заряженных частиц в плазме во внешнем электрическом поле существенно усложняется, так как напряженность электрического поля, действующего на каждую отдельно взятую частицу, складывается из напряженности внешнего поля и напряженности полей всех остальных частиц. Учесть при анализе все эти поля практически невозможно, в особенности при наличии столкновений между частицами, поэтому переходят к макроскопическому рассмотрению, основанному на статистическом осреднении индивидуальных взаимодействий полей частиц.

Пусть в полностью ионизованной плазме, находящейся в электрическом поле, все столкновения частиц носят только упругий характер. Движение частиц плазмы можно представить как сумму направленного движения со скоростью u и хаотического движения со скоростью w . Если через V обозначить вектор полной скорости частиц, то для каждого момента времени $V = u + w$. Среднее значение скорости хаотического движения равно нулю ($\langle w \rangle = 0$), и во внешнем поле $\langle V \rangle = \langle u \rangle$. Для однопипных частиц с одинаковой массой $\langle V \rangle = u$, так как скорости u всех однопипных частиц одинаковы.

Рассчитаем энергию частиц участвующих в направленном и хаотическом движении. Энергия частиц определяется квадратом скорости. Среднее значение квадрата полной скорости $\langle V^2 \rangle = \langle V^2 \rangle = \langle (u + w)^2 \rangle = \langle u^2 \rangle + \langle 2u \cdot w \rangle + \langle w^2 \rangle$.

Так как направления скорости хаотического движения равновероятны, то среднее значение произведения $\langle 2u \cdot w \rangle = 0$. Среднее значение полной энергии частиц в плазме

$$1/2 \langle (mV^2) \rangle = 1/2 (mu^2 + m\langle w^2 \rangle),$$

где $1/2 m\langle w^2 \rangle$ – есть средняя энергия хаотического движения.

Таким образом наложение внешнего электрического поля приводит к увеличению средней энергии частиц плазмы на величину кинетической энергии движения частиц в этом поле.

4. КОРОННЫЙ РАЗРЯД

Коронный разряд занимает особое место, так как именно коронный разряд используется в подавляющем большинстве технологий, получивших сегодня широкое промышленное использование.

4.1. Формы коронного разряда

Коронный разряд – это характерная форма самостоятельного газового разряда, возникающего в резко неоднородных полях. Главной особенностью этого разряда является то, что ионизационные процессы электронами происходят не по всей длине промежутка, а только в небольшой его части вблизи электрода с малым радиусом кривизны (так называемого коронирующего электрода). Эта зона характеризуется значительно более высокими значениями напряженности поля по сравнению со средними значениями для всего промежутка. Само название «коронный» разряд получил из-за своего свечения, наблюдаемого на тонких проводах и напоминающего солнечную корону.

Основными формами коронного разряда являются лавинная и стримерная. Названия этих форм обусловлены основными характерными процессами, имеющими место в зоне ионизации соответствующих коронных разрядов. Визуально лавинная корона наблюдается в виде относительно тонкого светящегося слоя на гладких электродах и в виде дискретных светящихся пятен на негладких (шероховатых) электродах. Стримерная корона наблюдается в виде слабо светящихся нитевидных каналов, длина которых в зависимости от конкретных условий может изменяться в широких пределах (от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров).

Часть промежутка, где происходят ионизационные процессы, называется чехлом коронного разряда, а оставшаяся часть промежутка, где происходит дрейф заряженных частиц, является зоной дрейфа. Если в зоне дрейфа существуют заряды только одного знака, то корону называют униполярной, а если заряды обоих знаков, то биполярной. Биполярная корона постоянного тока возникает тогда, когда имеется промежуток с двумя коронирующими электродами (например, промежуток провод–провод или игла–игла), к которому приложено постоянное напряжение. Униполярная корона существует там, где имеется промежуток только с одним коронирующим электродом или с несколькими коронирующими электродами с одинаковой полярностью питающего напряжения.

Процессы в чехле и в зоне дрейфа биполярной короны намного более сложны, чем в униполярной короне, т.к. появляется дополнительный механизм ионной рекомбинации в объеме промежутка и дополнительные механизмы вторичных процессов на электродах, что существенно усложняет математическое описание и моделирование этого вида разряда.

Лавинная форма коронного разряда может реализовываться в виде непрерывной и вспышечной короны. Вспышечный характер короны связан с тем, что подвижность электронов и ионов различается на три порядка. В результате при положительной полярности коронирующего электрода электроны быстро уходят на анод, а положительные ионы, дрейфуя от анода, оказываются в области слабого поля и не могут из-за низкой подвижности быстро уйти от анода. Поэтому напряженность поля у анода снижается и ионизация практически прекращается. Следующая лавинная вспышка может возникнуть только после того, как положительные ионы покинут зону ионизации. При положительной полярности коронирующего электрода вспышечная корона возникает как в электроотрицательных, так и в электроположительных газах.

При отрицательной полярности питающего напряжения вспышечный характер разряда возникает только в электроотрицательных газах, где электроны попадая в область слабого поля, прилипают к молекулам образуя мало подвижные ионы, а те в свою очередь снижают напряженность поля в зоне ионизации. Эти вспышечные импульсы получили название импульсов Тричела.

4.2. Униполярный коронный разряд

Основную часть промежутка между электродами при униполярном коронном разряде занимает зона дрейфа (внешняя зона коронного разряда), в которой движутся ионы только одного знака. Чехол коронного разряда, в котором сосредоточены ионизационные процессы, играет роль поставщика ионов для внешней зоны.

В технологических процессах главную роль играет внешняя зона коронного разряда. Как область поля с униполярным объемным зарядом она характеризуется определенным распределением напряженности поля E и плотности объемного заряда ρ .

Система уравнений поля для внешней зоны коронного разряда имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{E} = \rho / \varepsilon_0; & (4.1) \\ \vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi; & (4.2) \\ \operatorname{div} \vec{J} = 0; & (4.3) \\ \vec{J} = \rho \cdot k \vec{E}. & (4.4) \end{cases}$$

Первое уравнение – уравнение Пуассона – представляет собой запись теоремы Гаусса в дифференциальной форме и устанавливает связь между плотностью объемного заряда ρ и напряженностью поля E . Второе уравнение – известное выражение напряженности поля через потенциал φ . Далее следует уравнение неразрывности плотности тока. Четвертое уравнение отражает связь плотности тока J с плотностью объемного заряда ρ , напряженностью поля E и подвижностью ионов k .

Для решения данной системы уравнений должно быть определено три граничных условия. Ими являются заданные значения потенциалов электродов: коронирующего – $\varphi_1 = U$ и некоронирующего – $\varphi_2 = 0$. Третье граничное условие формулируется следующим образом – производная потенциала у поверхности коронирующего электрода равна начальной напряженности независимо от интенсивности коронного разряда:

$$(\partial \varphi / \partial r)_{r=r_0} = -E_0.$$

Последнее граничное условие соответствует расчетной схеме, когда зона ионизации у коронирующего электрода во внимание не принимается и ионы условно вводятся в промежуток непосредственно с поверхности коронирующего электрода. Количество поступающих ионов регулируется тем, что напряженность у поверхности коронирующего электрода должна поддерживаться на уровне начальной.

Качественное физическое обоснование граничного условия заключается в следующем. Если предположить, что напряженность поля у поверхности коронирующего электрода превосходит E_0 , то это приводит к резкому возрастанию интенсивности ионизации и увеличению объемного заряда, внедряемого в промежуток. Рост объемного

заряда в промежутке приводит к уменьшению напряженности поля у коронирующего электрода. Таким образом, подобная отрицательная обратная связь стабилизирует напряженность у коронирующего электрода на уровне начальной напряженности.

Непосредственные экспериментальные измерения напряженности поля у поверхности коронирующего электрода подтверждают, что она примерно соответствует начальной. Наконец, доводом в пользу правомерности такого допущения является совпадение рассчитанных на его основе и экспериментальных распределений поля для простейших систем электродов.

Решение системы уравнений (4.1) – (4.4) для конкретной системы электродов, используемой в технической установке, определяет распределение напряженности поля E и плотности объемного заряда ρ в рабочем объеме этой установки.

В систему уравнений в качестве параметра входит подвижность ионов k . Подвижность ионов определяется как скорость движения ионов в поле единичной напряженности и зависит от времени существования ионов. С течением времени подвижность ионов уменьшается за счет увеличения эквивалентной массы ионов в результате присоединения нейтральных молекул к первичному иону или электрону.

В диапазоне времен до 0,5 мс подвижности положительных и отрицательных ионов постоянны и составляют $k_+ = 2,1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $k_- = 2,24 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Старение ионов сказывается при $t > 0,5 \text{ мс}$, но и в этом случае можно пользоваться некоторой средней величиной.

Простейшими, но широко используемыми в технологических установках электродами являются коаксиальные цилиндры. Эта система состоит из заземленного цилиндрического электрода радиуса R , по оси которого располагается коронирующий электрод – провод радиуса r_0 .

Используются также другие системы электродов, такие как «ряд проводов между заземленными плоскостями», системы с коронирующими электродами в виде игл и т.д. Только для системы «коаксиальные цилиндры» система уравнений (4.1) – (4.4) имеет аналитическое решение, т.к. задача является одномерной.

Характеристики коронного разряда между коаксиальными цилиндрами. Коаксиальные цилиндры являются простейшей системой электродов, для которой уравнения (4.1) – (4.4) могут быть проинтегрированы аналитически.

Принимая во внимание, что в цилиндрических координатах напряженность поля зависит только от текущего радиуса, уравнение (4.1) можно записать в виде:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(rE) = \rho / \epsilon_0. \quad (4.5)$$

Обозначив через A ток коронного разряда на единицу длины электрода, уравнение неразрывности (4.3) можно представить в виде:

$$A = 2\pi rJ.$$

Отсюда, используя (4.4), можно получить:

$$\rho = A / 2\pi r k E. \quad (4.6)$$

После подстановки (4.6) в (4.5) последнее превращается в уравнение с разделяющимися переменными, которое легко интегрируется:

$$\int_{r_0 E_0}^{rE} rE d(rE) = \frac{A}{2\pi \epsilon_0 k} \int_{r_0}^r r dr.$$

Таким образом,

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi \epsilon_0 k} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \left(\frac{E_0 r_0}{r}\right)^2} \quad (4.7)$$

При $r \gg r_0$

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi \epsilon_0 k} + \left(\frac{E_0 r_0}{r}\right)^2} \quad (4.8)$$

Для интенсивного коронного разряда, когда $U \gg U_0$ (U_0 – начальное напряжение), второе слагаемое в (4.8) существенно меньше первого, и, следовательно,

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi \epsilon_0 k}}. \quad (4.9)$$

Из (4.8) и (4.9) следует, что напряженность поля в значительной части промежутка между коаксиальными цилиндрами постоянна (рис. 4.1). В соответствии с (4.6) плотность объемного заряда изменяется по гиперболе. Различие в распределениях электростатического поля и поля при коронном разряде обусловлено действием объемного заряда, сосредоточенного в промежутке.

Для определения вольтамперной характеристики коронного разряда $A = f(U)$ используется условие:

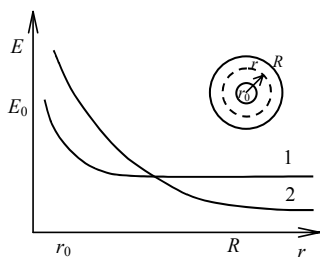


Рис. 4.1. Распределение электростатического поля (1) и поля при униполярном коронном разряде (2) между коаксиальными цилиндрами

$$\int_{r_0}^R E dr = U.$$

При подстановке в это уравнение в уравнения (4.7) и его интегрирования после упрощений получается уравнение вольтамперной характеристики, которое записывается в обобщенном виде:

$$I = kGU(U - U_0), \quad (4.10)$$

$$\text{где } G = \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln(R/r_0)} \left(1 + 2,75 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{R}{r_0}}\right).$$

Для других систем электродов используются приближенные методы, например, метод Дейча – Попкова. Пример распределения напряженности поля при коронном разряде для системы «провод–плоскость» представлен на рис. 4.2.

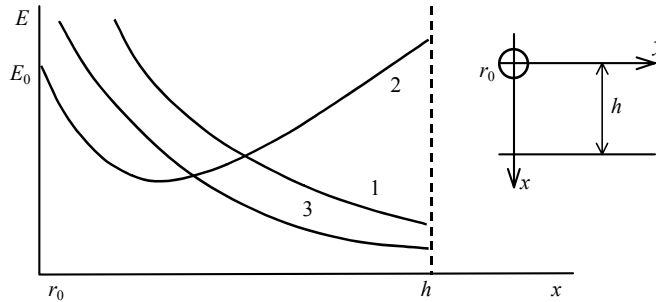


Рис. 4.2. Распределение напряженности поля (1 – электрического и 2 – при коронном разряде) и плотности объемного заряда (3)

В отличие от «коаксиальных цилиндров» при коронном разряде напряженность поля возрастает по направлению к плоскости, а не остается постоянной. Такое распределение поля характерно и для других систем электродов с цилиндрическими коронирующими электродами. Вольтамперная характеристика и для других систем электродов может быть представлена в виде (4.10), но коэффициент G в этом случае имеет свой вид.

Начальные и пробивные напряжения промежутков при коронном разряде. Начальное напряжение или начальная напряженность поля коронного разряда, является важным параметром, который необходимо знать при выборе той или иной системы электродов применительно к конкретной технологической установке. Превышение напряжения над начальным определяет интенсивность коронного разряда, а значит уровень необходимых рабочих напряжений электротехнологической установки. На практике удобно определять начальную напряженность промежутка между коаксиальными цилиндрами по эмпирической формуле Пика:

$$E_0 = 30,3\delta \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0\delta}}\right),$$

а начальное напряжение из выражения:

$$U_0 = E_0 r_0 \ln \frac{R}{r_0}$$

Начальное напряжение при положительной полярности электрода несколько больше, чем при отрицательной полярности. Объясняется это тем, что при развитии разряда с отрицательного электрода коэффициент вторичной ионизации γ больше, чем при положительной полярности электрода, поскольку в этом случае его значение определяется не только фотоионизацией в объеме, но еще и фотоионизацией на электроде.

Пробивные напряжения промежутков между электродами при коронном разряде определяют предельные напряженности поля, при которых еще могут работать технологические установки, использующие коронный разряд.

Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении, большем начального (рис. 4.3). Если разрядный промежуток несимметричный, т.е. его электроды имеют разные радиусы кривизны, то пробивное напряжение зависит от полярности электрода с меньшим радиусом кривизны: при отрицательной полярности оно существенно выше, чем при положительной полярности (рис. 4.4). Объясняется это тем, что при положительной полярности подвижные электроны легко уходят из зоны разряда на электрод, а оставшийся в промежутке положительный объемный заряд усиливает напряженность поля во внешней части промежутка, способствуя дальнейшему развитию разряда. При отрицательной полярности питающего напряжения, напротив, малоподвижный положительный объемный заряд уменьшает напряженность поля во внешней части промежутка, и для развития разряда требуется значительно большее напряжение.

Средние разрядные градиенты напряжения при положительной полярности стержня составляют 4,5 кВ/см, а при отрицательной примерно 10 кВ/см. Эти значения, в свою очередь, примерно в 3–5 раза меньше чем в однородном поле (24,5 ÷ 30 кВ/см).

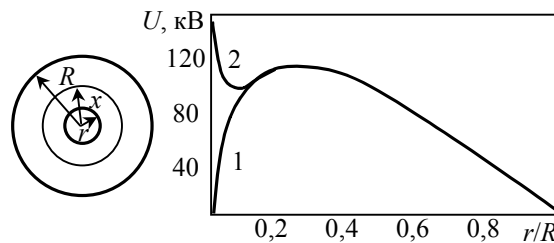


Рис. 4.3 Разрядные (2) и начальные (1) напряжения воздушного промежутка между коаксиальными цилиндрами ($R = 10 \text{ см}$)

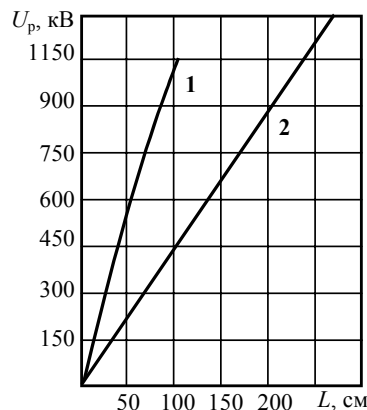


Рис. 4.4 Разрядные напряжения воздушных промежутков стержень-плоскость при отрицательной (1) и положительной (2) полярностях постоянного напряжения питания стержня

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОСНОВАННЫЕ НА СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА МАТЕРИАЛЫ

5.1 Введение

Если частицам мелкодробленого (диспергированного) материала сообщен некоторый заряд, то на эти частицы в электрическом поле действует сила $F = Eq$, которая заставляет частицы двигаться. Различные формы этого движения можно использовать для выполнения разнообразных технологических операций. Широкое распространение технологий, основанных на управлении движением заряженных частиц полем, связано с наличием целого ряда преимуществ этих технологий перед традиционными методами воздействия на обрабатываемый материал.

— Прежде всего, следует указать на непосредственное воздействие электрической энергии, сосредоточенной в электрическом поле, на обрабатываемый материал без промежуточных трансформаций энергии, а значит и без дополнительных потерь, сопровождающих эти промежуточные трансформации.

— В природе нет веществ как проводящих или полупроводящих, так и диэлектрических, которые тем или иным способом не могли бы быть заряжены и подвергнуты силовому воздействию электрического поля. Отсюда следует свойство универсальности методов рассматриваемой технологии.

— Эта универсальность не ограничивается сколько-нибудь значительно тем обстоятельством, что наиболее эффективное воздействие электрических полей на сырье может проявляться в случае, если последнее находится в диспергированном состоянии, т.к. взаимодействие поля с веществом происходит главным образом на границе раздела сред. Следует иметь в виду, что огромная масса сырья по своей природе либо уже находится в диспергированном состоянии, либо легко может быть приведена в такое состояние при добыче и последующей обработке. Например, добыча полезных ископаемых неизбежно сопровождается существенным измельчением руд. Степень раздробленности может быть различной: от частиц субмикронных размеров до частиц в несколько десятков миллиметров.

— Данные методы позволяют обеспечить легкое и универсальное управление процессами за счет возможности плавного регулирования в широких пределах величины напряжения (или что тоже самое напряженности электрического поля). Последнее обстоятельство позволяет говорить о возможности обеспечения высокого класса точности.

Силовое воздействие электрического поля на частицы сырья может реализовываться в различных формах и иметь различный конечный результат.

1. Частицы вещества при помещении их в электрическое поле поляризуются. Если они продолговатой формы, то возникают силы, ориентирующие частицы по силовым линиям поля. Эта способность лежит в основе технологий изготовления текстильных и композиционных материалов.

2. Так как свойства отдельных частиц отличаются, то возникают силы, которые кроме ориентации заставляют частицы двигаться с различными скоростями и по различным траекториям. Это позволяет осуществлять сепарацию и классификацию частиц по диэлектрическим свойствам, электропроводности и размерам.

3. При наличии избыточного электрического заряда частицы независимо от физических свойств будут двигаться в электрическом поле по направлению к электродам, имеющим заряд противоположный по знаку заряду частиц. Это позволяет выделять частицы из несущей их газовой среды, т.е. осуществлять очистку газа от жидких и твердых диспергированных материалов.

4. Частицы, осаждающиеся на электрод, удерживаются на его поверхности за счет сил зеркального отображения, создавая плотный слой. При этом имея одноименный заряд, частицы расталкиваются и обеспечивают равномерность покрытия, что используется при нанесении полимерных порошковых покрытий в электрическом поле для декоративных и антикоррозионных целей.

5. Взаимодействие зарядов, осажденных на поверхность фотополупроводников, с заряженными частицами проявляющих материалов приводит к их избирательному осаждению. Это явление было положено в основу электропечати.

6. Зарядка частиц диспергированных материалов разноименными зарядами позволяет произвести однородное смешивание материалов.

Все эти электротехнологические процессы содержат три основные стадии, которые и определяют структурную схему типовой технологической установки (рис. 5.1).

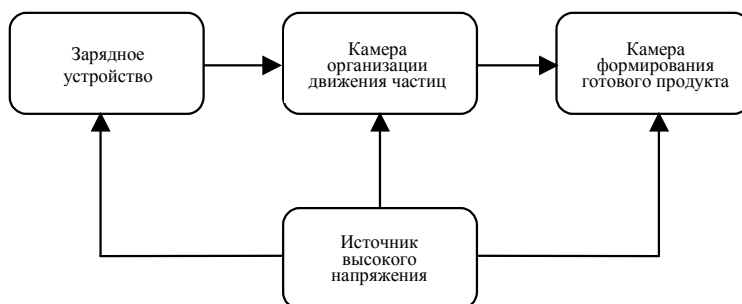


Рис. 5.1 Структурная схема типовой электротехнологической установки

В соответствии с этой схемой теоретическую основу процессов составляют закономерности зарядки и движения частиц в электрическом поле.

5.2. Зарядка частиц

В настоящее время используются следующие методы зарядки частиц, т.е. сообщения частицам избыточного заряда: 1) ионная зарядка; 2) индукционная зарядка; 3) статическая электризация.

5.2.1. Ионная зарядка

Метод заключается в том, что ионы, движущиеся в газовой среде, например, во внешней зоне коронного разряда, и сталкивающиеся с частицей, осаждаются на ее поверхности. Обратно ионы не могут возвратиться из-за того, что они должны обладать определенной энергией для преодоления потенциального барьера на границе раздела сред. Таким образом происходит накопление ионов на частице.

Рассмотрим зарядку частицы в электрическом поле с униполярным объемным зарядом. Увеличение заряда частицы определяется количеством ионов, попадающих на частицу в единицу времени:

$$\frac{dq}{dt} = e \int_S \bar{f} d\bar{s}, \quad (5.1.)$$

где q – заряд частицы; e – заряд электрона; \bar{f} – вектор плотности потока ионов; S – площадь поверхности частицы, на которую осаждаются ионы.

Поток ионов на частицу определяется движением ионов под действием электрического поля и движением, вызванным диффузией ионов за счет градиента концентрации ионов:

$$\bar{f} = nk\bar{E} - D \text{grad } n, \quad (5.2.)$$

где E – напряженность электрического поля у поверхности частицы; n , k – концентрация и подвижность ионов; D – коэффициент диффузии.

Определим, при каких условиях преобладает зарядка частица за счет осаждения ионов под действием электрического поля («ударная» зарядка) и когда преобладает движение ионов под действием диффузионного механизма («диффузионная» зарядка). Из выражения (5.2.) следует, что «диффузионный» механизм преобладает над «ударным» при условии, если $D \text{grad } n \gg nkE$. Предполагая, что у поверхности частицы $n = 0$, а ее возмущающее воздействие на концентрацию ионов распространяется на расстояние равное $2a$, получаем $\text{grad } n \sim n_0/2a$. При атмосферном давлении в соответствии с молекулярно-кинетической теорией газов $D \sim 0,025 k$. Поэтому можно записать $E \ll 0,025/(2a)$. Для условий, наблюдаемых в аппаратах электронно-ионной технологии, когда $E \sim (1 \div 3) \text{ кВ/см}$,

получаем, что при размерах частиц $2a \ll 0,1$ мкм преобладает «диффузионный» механизм зарядки частиц. «Ударная» зарядка преобладает в этих условиях для частиц размером $2a \gg 1$ мкм.

«Ударная» зарядка частиц в электрическом поле.

Результирующая напряженность поля у поверхности частицы определяется следующими составляющими: внешним полем $E_{вн}$, полем поляризации частицы $E_{п}$, полем заряда ионов, осевших на частицу, E_q , полем зеркального отображения иона в поверхности частицы E_3 :

$$E = E_{вн} + E_{п} + E_q + E_3 \quad (5.3)$$

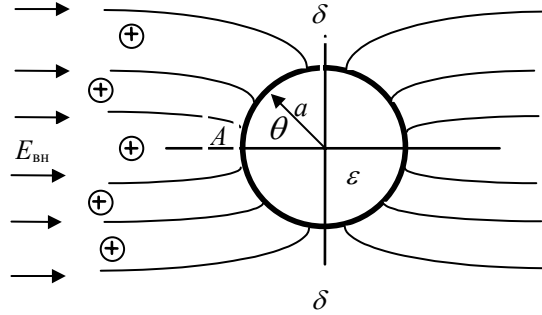


Рис. 5.2. Схема ударной зарядки сферической частицы

Для сферической частицы (рис. 5.2) радиусом a и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ в воздухе нормальная составляющая внешнего поля с учетом поля поляризации частицы (положительное направление – к частице) равна:

$$E_{внп} + E_{пп} = E_{вн} \cos \theta + \frac{2(\epsilon - 1)}{\epsilon + 2} E_{вн} \cos \theta = E_{вн} k_{\epsilon} \cos \theta \quad (5.4)$$

где θ – меридиональный угол сферической системы координат, $k_{\epsilon} = 1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2) = 3\epsilon/(\epsilon + 2)$ – коэффициент, учитывающий относительную диэлектрическую проницаемость частицы.

Напряженность кулоновского поля от заряда частицы, отталкивающего подлетающие ионы, равна

$$E_q = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 a^2}. \quad (5.5)$$

Поле зеркального отображения иона действует на малом расстоянии от поверхности частицы, и его можно учесть как увеличение эффективного радиуса частицы, поскольку все ионы, попавшие в пределы зоны действия силы зеркального отображения, захватываются частицей. Для рассматриваемых размеров частиц этим увеличением можно пренебречь.

Подставляя значения напряженностей электрического поля в выражения (5.2) и (5.1), получим:

$$\frac{dq}{dt} = ek \int nk_{\epsilon} E_{вн} \cos \theta \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 a^2} ds. \quad (5.6)$$

Численные расчеты показывают, что концентрация ионов при движении в электрическом поле в указанных условиях не изменяется вдоль траектории движения ионов. Если на достаточном удалении от частицы эта концентрация равна n_0 , то она n_0 и вдоль поверхности частицы. Следовательно, она может быть вынесена за знак интеграла в формуле (5.6). Интегрирование в (5.6) производится в сферической системе координат по той части поверхности частицы, где поле обеспечивает попадание иона на частицу. Следовательно:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{en_0 k}{4\epsilon_0 q_m} [q(t) - q_m]^2, \quad (5.7)$$

где $q_m = 4\pi\epsilon_0 k_{\epsilon} a^2 E_{вн}$ – максимальный заряд частицы.

Очевидно, что в самом начале зарядки частицы ($q = 0$) ионы осаждаются на всей левой половине частицы (граница $\delta-\delta$). По мере накопления заряда на частице, благодаря усилению отталкивающего поля область осаждения ионов сокращается (граница $\delta-\delta$ смещается влево) вплоть до нуля (граница $\delta-\delta$ проходит через точку A). В этом случае зарядка частицы прекращается и частица приобретает максимальный заряд.

Решением дифференциального уравнения (5.7) является выражение (формула Потенье):

$$q(t) = q_m \frac{en_0 kt}{4\epsilon_0 + en_0 kt}, \quad (5.8)$$

Для проводящей частицы можно считать, что $\epsilon \rightarrow \infty$ и $k_{\epsilon} = 3$. Тогда:

$$q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_{вн}. \quad (5.9)$$

При зарядке частицы в биполярной короне, когда в пространстве, окружающем частицу, наряду с ионами одного знака (например, положительными – n_+ , k_+) присутствуют ионы другого знака (отрицательные – n_- , k_-), поток

зарядов на частицу имеет две составляющие: положительную, увеличивающую заряд частицы, и отрицательную, уменьшающую ее заряд.

Предельный заряд в этом случае равен:

$$q_{\text{пред}} = q_m \frac{1 - \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}{1 + \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}, \quad (5.10)$$

где $\gamma_{v+} = en_+ k_+$ и $\gamma_{v-} = en_- k_-$ – проводимости, определяемые соответственно положительными и отрицательными зарядами. Из формулы (5.10) видно, что предельный заряд, приобретаемый частицей в поле биполярного коронного разряда, меньше максимального заряда частицы, получаемого при униполярной зарядке $q_{\text{пред}} < q_m$.

«Диффузионная» зарядка частиц.

Для малых частиц ($2a \ll 0,1$ мкм) поток ионов на частицу определяется только процессом диффузии, а из электрических сил необходимо учитывать лишь отталкивающее воздействие приобретаемого заряда частицы. Тогда общий поток ионов на частицу будет равен:

$$I = \oint_s \left(D \frac{dn}{dr} - kn \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \right) ds. \quad (5.11)$$

За положительное направление принято направление потока к центру частицы. Подстановка в (5.1) и интегрирование уравнения дает решение в неявном виде:

$$t = \frac{\epsilon_0}{en_0 k} [E_i(A) - c_0 - \ln A], \quad (5.12)$$

где E_i – интегральная показательная функция; $A = kq/(D4\pi\epsilon_0 a)$; $c_0 = 0,577$ – постоянная Эйлера.

Определив величину

При диффузионном

неограниченно.
накопления заряда на
действия растет градиент
за счет сосредоточения
слое вблизи поверхности
показывает, что основной
период времени

мало. За предельный заряд
Строго

одновременном учете «ударного» и «диффузионного» механизмов зарядки нет и задача решается численно. В результате численных расчетов установлено, что при $0,1 \leq a \leq 1$ мкм величину заряда можно вычислять как сумму зарядов, рассчитанных по формулам «ударной» и «диффузионной» зарядки.

Если форма частиц существенно отличается от сферической, то используется замена частицы на частицу эллипсоидальной формы эквивалентную по соотношению осей и объема. Следует иметь в виду, что если форма частицы близка к сферической, то она при зарядке вращается. Частицы удлиненной формы в электрическом поле приобретают определенную ориентацию, и это обстоятельство следует учитывать при расчете величины заряда. Формулы для «ударной» и «диффузионной» зарядки эллипсоидов можно найти в соответствующей литературе.

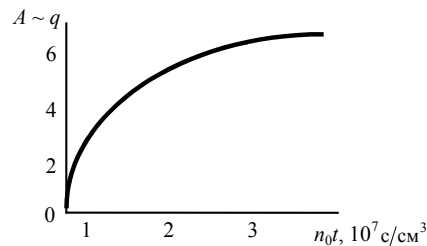


Рис.5.3. Зависимость параметра A от времени

А из (5.12) легко можно найти заряд q.

механизме зарядки заряд растет во времени. Объясняется это тем, что по мере частице и роста его отталкивающего изменения концентрации все в более узком частицы. Однако график (рис. 5.3) заряд частица приобретает в начальный ($n_0 t \leq 2 \cdot 10^7$ с/см³), а далее он изменяется принимается $A_{\text{пред}} = 6,7$ при $n_0 t = 4 \cdot 10^7$ с/см³. аналитического решения задачи при

5.2.2. Индукционная зарядка частиц

Механизм индукционной зарядки поясним, рассматривая движение сферической проводящей частицы в поле плоского конденсатора (рис. 5.4).

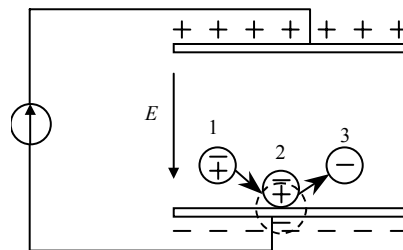


Рис. 5.4. Схема индукционной зарядки частиц

Частица, попадающая в промежуток между пластинами, поляризуется (позиция 1). При контакте с электродом (позиция 2) взаимодействие зарядов частицы и электрода приводит к нейтрализации ближайшего к точке контакта поляризационного заряда. Далее, если частица отрывается (позиция 3), то она уносит избыточный заряд.

Таким образом, индукционный механизм зарядки включает поляризацию частицы в электрическом поле и нейтрализацию одного из зарядов. Не обязательно это происходит при контакте с электродом. Например, разделение зарядов происходит при разрыве капель в электрическом поле.

Зарядка при контакте с электродом в электрическом поле.

Для расчета индукционной зарядки рассмотрим частицу в виде проводящего полуэллипсоида, находящегося на поверхности плоского электрода в электрическом поле (рис. 5.5, $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$, удельные электропроводности $\gamma_{v1} = \gamma_{v2} = 0$).

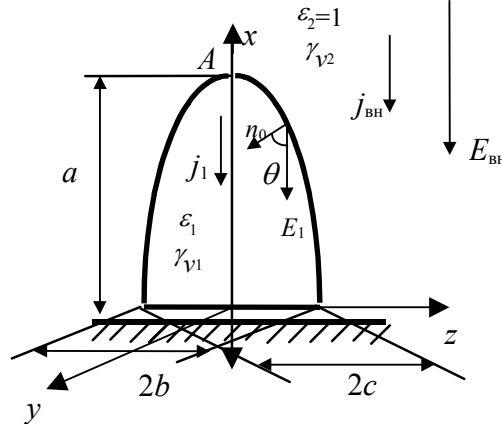


Рис.5.5. Полуэллипсоид на электроде

Полуэллипсоид за счет изменения соотношения осей позволяет моделировать частицы различной формы. Форма в виде полуэллипсоида удобна для расчета поля, так как за счет зеркального отображения плоской поверхности электрода от системы полуэллипсоид на плоскости в однородном поле можно перейти к системе эллипсоид в однородном поле. Для такого случая известно аналитическое распределение поля на поверхности и в окрестности эллипсоида, находящегося в однородном поле.

Тогда напряженность электрического поля у поверхности проводящего полуэллипсоида E_n запишется в виде:

$$E_n = -\frac{E_{вн}x}{a^2 d_a} \left[\left(\frac{x}{a^2} \right)^2 + \left(\frac{y}{b^2} \right)^2 + \left(\frac{z}{c^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (5.13)$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида, d_a – коэффициент деполяризации эллипсоида в направлении оси x .

Коэффициент деполяризации отражает изменение напряженности поля эллипсоидом в направлении соответствующей оси. Для сферы имеем $d_a = d_b = d_c = 1/3$. Если сфера моделируется полуэллипсоидом, то $b/a = c/a = 0,5$ и $d_a = 0,172$.

Имея в виду, что плотность поверхностного заряда связана с напряженностью поля у поверхности электрода соотношением

$$\sigma = -\varepsilon_0 E_n, \quad (5.14)$$

то индукционный заряд полуэллипсоида можно определить по формуле:

$$q = \int_s \sigma ds = -\varepsilon_0 \int_s E_n ds. \quad (5.15)$$

После подстановки (5.13) в (5.15) и интегрирования в эллипсоидальной системе координат по внешней поверхности полуэллипсоида получим:

$$q = -\pi \varepsilon_0 E_{вн} \frac{bc}{d_a} \quad (5.16)$$

Таким образом, проводящая частица на поверхности электрода в электрическом поле, вектор напряженности которого направлен к поверхности электрода, приобретает отрицательный заряд и на нее действует отрывающая от поверхности электрическая сила.

Зарядка полупроводящей частицы, находящейся на электроде в поле униполярного коронного разряда.

В общем случае частица характеризуется некоторой определенной величиной удельной объемной электропроводности γ_{v1} и находится на электроде не в электростатическом поле, а в поле униполярного коронного разряда, т.е. $\gamma_{v2} \neq 0$ и $J_{вн} \neq 0$. Тогда зарядка не проходит мгновенно и изменение заряда во времени определяется уравнением неразрывности плотности полного тока (тока проводимости и смещения) на поверхности частицы (рис. 5.5):

$$\gamma_{v2} E_{2n} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{dE_{2n}}{dt} = \gamma_{v1} E_{1n} + \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{dE_{1n}}{dt}. \quad (5.17)$$

Поскольку в начальный момент времени частица поляризуется как диэлектрический эллипсоид, то поле внутри частицы является однородным и направлено параллельно $E_{вн}$. Это означает, что $E_{1n} \sim \cos \theta$, где θ – угол между нормалью к поверхности и вектором E_1 . Отсюда из условия равенства нормальных составляющих вектора электрического смещения внутри и снаружи полуэллипсоида получаем:

$$E_{2n} = E_{1n} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sim \cos \theta,$$

где $E_{вн}$ – нормальная составляющая напряженности электрического поля на внешней поверхности полуэллипсоида.

Тогда плотность связанных зарядов $\sigma_{связ} = \varepsilon_0 (E_{1n} - E_{2n}) \sim \cos \theta$.

Количество заряда, оседающего в единицу времени на единицу поверхности частицы в результате протекания тока коронного разряда равно:

$$J_{2n} - J_{1n} = \gamma_{v2} E_{2n} - \gamma_{v1} E_{1n} \sim \cos \theta.$$

Таким образом, суммарная плотность свободного и связанного зарядов $\sigma = \sigma_A \cos \theta$ (пропорциональна $\cos \theta$), где σ_A – суммарная плотность свободного и связанного зарядов в вершине A полуэллипсоида.

Поскольку в процессе зарядки E_{1n} , E_{2n} , σ остаются пропорциональными $\cos \theta$, то уравнение неразрывности (5.17) достаточно решить только для вершины эллипсоида A .

Для вершины эллипсоида справедливо:

$$E_{1n}^A = E_{\text{вн}} + d_a \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0}; \quad E_{2n}^A = E_{\text{вн}} - (1 - d_a) \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0}. \quad (5.18)$$

Подставляя (5.18) в (5.17) и интегрируя по поверхности частицы, получим:

$$q(t) = q_{\infty} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (5.19)$$

$$q_{\infty} = \frac{\pi \varepsilon_0 b c E_{\text{вн}} (\varepsilon_1 \gamma_{v2} - \gamma_{v1})}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)}$$

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 d_a + 1 - d_a}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)}$$

где q_{∞} – предельный заряд, приобретаемый частицей, τ – постоянная времени зарядки частицы.

Из полученных зависимостей следует, что зарядка частицы во времени носит экспоненциальный характер.

При $\varepsilon_1 \gamma_{v2} > \gamma_{v1}$ (частица плохо проводящая) $q_{\infty} > 0$, т.е. частица приобретает избыточный положительный заряд и на нее действует прижимающая электрическая сила.

При $\varepsilon_1 \gamma_{v2} < \gamma_{v1}$ (частица хорошо проводящая) $q_{\infty} < 0$, т.е. частица приобретает избыточный отрицательный заряд и на нее действует отрывающая электрическая сила.

5.2.3. Статическая электризация

Статическая электризация происходит при контакте и последующем разделении тел, обладающих различными физическими или химическими свойствами. Контактующие тела приобретают заряды различных знаков. Статическая электризация происходит и в отсутствие внешнего поля. Основной физической величиной, определяющей электрические явления при контакте твердых тел, является работа выхода электрона. Разница работ выхода электрона у контактирующих тел приводит к нарушению их нейтрального состояния. Материал, для которого работа выхода $A_{\text{вых}}$ меньше, при контакте более легко теряет электроны и, таким образом, заряжается положительно. Значение образующихся зарядов пропорционально разнице работ выхода.

Для большинства диэлектрических частиц действует правило Козна: при приведении в контакт и разъединении двух диэлектриков вещество с большей относительной диэлектрической проницаемостью заряжается положительно.

Так как состояние поверхности контактирующих частиц зависит от множества факторов (параметров внешней среды, загрязненности поверхности и т.д.), то приобретаемые заряды зависят существенно от конкретных условий и определяются экспериментально.

5.3. Движение частиц в электрическом поле

Движение частиц рассматривается как движение их центра масс. Это означает, что вращение частиц, если требуется, следует учитывать отдельно. По второму закону Ньютона:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F}. \quad (5.20)$$

На частицу, находящуюся в воздушной среде и в электрическом поле, действуют следующие силы:

1. Сила тяжести $F_{mg} = mg$, где g – вектор ускорения свободного падения.

2. Сила действия электрического поля на заряженную частицу

$$F_q = Eq. \quad (5.21)$$

3. Сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля.

Сферическая частица, находящаяся в электрическом поле, приобретает заряды поляризации q_n (рис.5.6). Сила, действующая на сферу в неоднородном электрическом поле, равна

$$F = E_1 q_n - E_2 q_n = q_n \delta E = q_n 2a \text{grad} E.$$

Оценки силы, обусловленной неравномерным распределением электрического поля, показывают, что она мала по сравнению с другими силами, действующими на частицу, и поэтому этой силой можно пренебречь, за исключением случаев, когда частица незаряжена, а неоднородность поля велика.

4. Сила сопротивления среды движению частицы F_c . Сила возникает в связи с тем, что движущееся тело вызывает появление в окружающем пространстве течение воздуха. Возбуждение течения требует некоторой затраты энергии, которая забирается у движущегося тела. Таким образом, тело тормозится.

Силу сопротивления среды можно рассчитать, если известно распределение скорости течения воздуха, вызванного телом. Распределение скорости воздуха вокруг движущегося тела рассчитывается из уравнения Навье–Стокса:

$$\underbrace{\gamma_v \frac{d\bar{u}}{dt}}_{\text{сила инерции}} = \underbrace{\gamma_v \bar{F}}_{\text{внешние силы}} - \underbrace{\text{grad } p}_{\text{силы давления}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \bar{u}}_{\text{силы вязкости}} \quad (5.22)$$

и уравнения неразрывности течения жидкости:

$$\text{div } \bar{u} = 0.$$

Здесь \bar{u} – вектор скорости течения жидкости; γ_v – плотность среды; μ – коэффициент динамической вязкости среды ($\mu_{\text{возд}} = 1,85 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с)); p – давление.

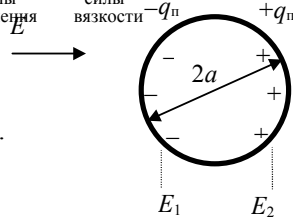


Рис.5.6. Поляризация частицы в электрическом поле

Даже в самом простом случае – для сферической частицы – решение уравнения движения удастся получить только при упрощающих предположениях. Эти упрощения определяются величиной числа Рейнольдса, устанавливающего соотношение между силами инерции и вязкости:

$$\text{Re} \approx \frac{F_{\text{инерции}}}{F_{\text{вязкости}}} = \frac{\gamma_v \frac{d\bar{u}}{dt}}{\mu \nabla^2 \bar{u}} \cong \frac{\gamma_v \frac{u}{l}}{\mu \frac{u}{l^2}} = \frac{\gamma_v u l}{\mu} = \frac{u l}{\nu}, \quad (5.23)$$

где $\nu = \mu/\gamma_v$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха; l – характерный размер течения (для течения жидкости в трубе – диаметр трубы; для частицы – диаметр частицы).

Для движущейся сферической частицы

$$\text{Re} = \nu^2 a / \nu, \quad (5.24)$$

где ν – скорость частицы относительно газовой среды, ν – коэффициент кинематической вязкости.

В технологических процессах обычно используют частицы размером не более 300 мкм. Скорости частиц обычно меньше 10 м/с и чаще всего составляют 1÷3 м/с. Наибольшие значения числа Рейнольдса достигают 100, обычно они лежат в диапазоне 0,1÷10.

Упрощая уравнение Навье–Стокса Стокс получил формулу для силы сопротивления сферы движению сферической частицы, справедливую при $\text{Re} \leq 0,5$:

$$F_c = -6\pi\mu a V.$$

При широком диапазоне значений Re следует использовать следующую формулу для силы сопротивления

$$\bar{F}_c = C_x \frac{\gamma_v \nu \bar{V}}{2} s, \quad (5.25)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; s – характерное сечение тела (для сферы $s = \pi a^2$, a – радиус).

В результате обобщения экспериментальных данных получена зависимость $C_x = f(\text{Re})$, которая представлена на рис. 5.7.

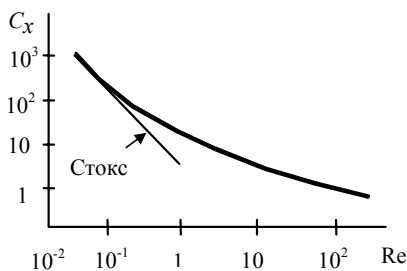


Рис.5.7. Зависимость C_x от Re

Наиболее удачной аппроксимацией этой зависимости является формула Клячко:

$$C_x = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \text{Re}^{2/3} / 6 \right) \quad (5.26)$$

Из (5.25) и (5.26) следует, что сила сопротивления среды нелинейно зависит от скорости (рис. 5.8)

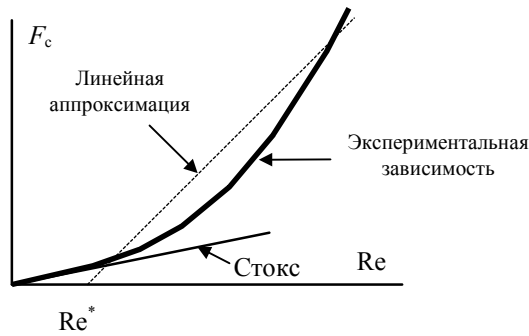


Рис.5.8. Линейная аппроксимация зависимости силы сопротивления от числа Рейнольдса

Для аналитических расчетов более удобно использовать линейную аппроксимацию от числа Рейнольдса

$$F_c = k_c 6\pi\mu a(v - v^*), \quad (5.27)$$

где k_c , $v^* = (Re^* v)/2a$ – коэффициенты линейной аппроксимации (рис. 5.8)

Движение частицы в однородном электрическом поле.

При движении сферической частицы из состояния покоя под действием постоянных внешних сил при $Re < 0,5$ уравнение движения запишется в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = F - 6\pi\mu a v, \quad (5.28)$$

где $F = Eq + mg$ – внешние силы, определяемые воздействием электрического и гравитационного полей.

Если заряд частицы и напряженность поля неизменны, то решение уравнения имеет вид:

$$v = v_{уст} (1 - e^{-t/\tau}),$$

где $v_{уст} = F/(6\pi\mu a)$ – установившаяся скорость движения частицы; $\tau = m/(6\pi\mu a)$ – постоянная времени, определяющая характерное время изменения скорости частицы.

Постоянная времени связана с длиной инерционного пробега частицы – l_u . Если частица имеет начальную скорость v_0 , то при отсутствии воздействия внешних сил до полной остановки своего движения она пройдет путь, равный:

$$l_u = \int_0^\infty v dt = \int_0^\infty v_0 e^{-t/\tau} dt = v_0 \tau.$$

Чем больше проявляется влияние инерционных свойств частицы, тем больше длина инерционного пробега.

Для расчета движения частиц при $Re > 0,5$ можно воспользоваться линейной аппроксимацией силы сопротивления среды в виде (5.27). Тогда решение записывается по аналогии с решением уравнения (5.28). Более сложный для расчета случай имеет место, когда заряд частиц и напряженность поля в процессе движения изменяются. Аналитическое решение для этого случая отсутствует.

Более просто решается задача, если силами инерции при расчете можно пренебречь. Возможность такого упрощения определяется числом Стокса.

Число Стокса представляет собой отношение длины инерционного пробега частицы при скорости v_x к характерному размеру l – расстоянию, на котором действующая на частицу внешняя сила претерпевает изменение, соизмеримое с ее средним значением:

$$St = l_u / l = v_x \tau / l. \quad (5.29)$$

Под характерной скоростью понимается скорость, определяемая действием внешних сил без учета сил инерции.

Таким образом, число Стокса определяет влияние сил инерции на движение частицы под действием переменной внешней силы. Если $St \ll 1$, то движение частицы можно считать безынерционным.

По аналогии с понятием подвижности ионов можно ввести понятие подвижности частицы:

$$B_q = v/E = q v/F = qB, \quad (5.30)$$

здесь $B = v/F = 1/6\pi\mu a$.

Таким образом, подвижность частицы, обладающей зарядом q , представляет собой установившуюся скорость движения в поле единичной напряженности.

Для случая, когда частица приобретает заряд в поле коронного разряда, можно построить зависимость подвижности от размера частиц (рис. 5.9).

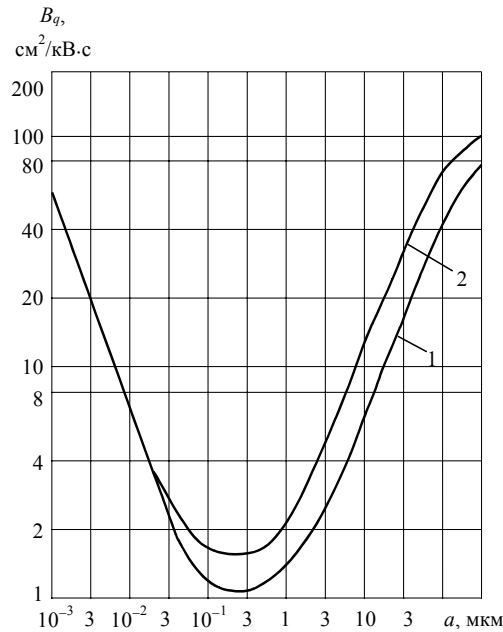


Рис. 5.9. Зависимость подвижности B_q от радиуса частиц
1 – $E = 1 \text{ кВ/см}$; 2 – $E = 3 \text{ кВ/см}$

Подвижность имеет минимум при размере частиц $2a$ равном $0,3 \div 0,5 \text{ мкм}$. Возрастание подвижности для частиц очень малого размера объясняется уменьшением силы сопротивления среды из-за того, что размер частиц становится соизмеримым с длиной свободного пробега молекул воздуха (поправка Кенингема).

Возрастание подвижности для частиц $2a \geq 1 \text{ мкм}$ объясняется тем, что начинает работать механизм «ударной» зарядки и имеет место квадратичный характер зависимости заряда от размера частиц. Тогда в соответствии с (5.29) подвижность растет пропорционально размеру частиц.

Для расчета силы сопротивления среды движению частиц несферической формы используется замена на эллипсоид, эквивалентный частице по объему и соотношению осей. В литературе имеются данные по коэффициенту сопротивления для эллипсоидов.

При движении начиная с переходного значения Re частицы приобретают определенную ориентацию (за счет гидродинамического взаимодействия с окружающей средой). Ориентация такова, что частица при движении испытывает максимальное сопротивление. Например, на цилиндрическую удлиненную частицу при движении в воздушной среде в электрическом поле действуют два вращающих момента (рис. 5.10).

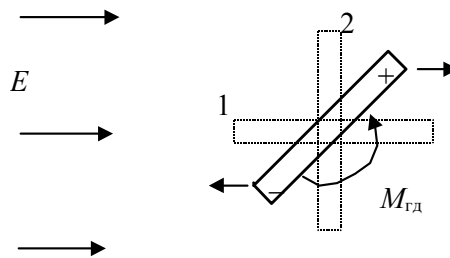


Рис. 5.10. Силы, действующие на частицу несферической формы

С одной стороны электрическое поле стремится развернуть поляризованную частицу таким образом, чтобы она расположилась своей большой осью вдоль силовых линий электрического поля (положение 1). С другой стороны гидродинамические силы сопротивления среды движению частицы – $M_{гд}$ – стремится развернуть ее таким образом, чтобы лобовое сопротивление было максимальным из всех возможных положений частицы, то есть перпендикулярно направлению движения частицы под действием сил электрического поля. В результате может устанавливаться некоторая промежуточная ориентация частицы в электрическом поле, как показано на рис. 5.10.

5.4. Коллективные процессы в заряженном аэрозоле

С увеличением концентрации частиц уже становится невозможным рассматривать движение частиц независимо, а необходимо учитывать их взаимное влияние.

Во-первых, изменяются условия зарядки частиц. Из-за увеличения концентрации частиц их зарядка может происходить при дефиците ионов. Это приводит к замедлению процесса зарядки. Кроме того, изменяется распределение напряженности поля, что влияет на предельный заряд частиц. Более сильное влияние оказывает на процесс зарядки дефицит ионов. Перераспределение поля происходит не в столь сильной степени и поэтому оказывает меньшее влияние.

При большой концентрации частиц начинает действовать процесс объединения частиц в агрегаты при соударении друг с другом. Для коагуляции необходимо соударение и, в зависимости от механизма, вызывающего соударения, различают ряд видов коагуляции, среди которых наиболее важное значение имеют гравитационная (различная скорость падения частиц разного размера под действием силы тяжести) и электрическая (взаимодействие заряженных и незаряженных частиц в электрическом поле).

Наконец, изменяются закономерности движения частиц из-за влияния электрического поля, созданного совокупным действием других частиц. Примером является электростатическое рассеяние облака заряженных частиц.

6. ОЧИСТКА ГАЗОВ ОТ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ

6.1. Задача очистки газов от пыли

Во многих технологических процессах промышленные газы содержат мелкие твердые или жидкие частицы, от которых должны быть очищены. В целом ряде производств эти частицы являются конечным продуктом, например, в производстве некоторых цветных металлов, сажи, цемента, улавливании катализаторов при нефтепереработке.

В других случаях требуется очистка газа от взвешенных частиц, как, например, при подготовке воздуха при производстве серной кислоты, или очистка воздуха в специальных помещениях при производстве полупроводниковых приборов или фотокиноплёнки. Получают распространение бытовые электрофильтры, используемые для очистки воздуха жилых помещений.

Наиболее широкое распространение получили электрофильтры для санитарной очистки дымовых газов тепловых электростанций. Так при сжигании твердого топлива только на одном блоке мощностью 500 МВт образуется примерно 500 м^3 дымовых газов в секунду, содержащих до 20 г/м^3 взвешенных частиц золы. Это соответствует выбросам в атмосферу 360 тонн золы в час.

Электрофильтры являются на сегодняшний день наиболее эффективным средством очистки газов благодаря ряду особенностей:

1. В электрофильтрах достигается высокая степень очистки газа до 99,9%;
2. Электрофильтры имеют очень низкое гидравлическое сопротивление потоку газа;
3. Электрофильтры позволяют улавливать взвешенные частицы в широком диапазоне размеров (от долей микрон до десятков миллиметров);
4. Электрофильтры легко регенерируются;
5. Весь процесс очистки газов электрофильтрами легко поддается автоматизации.

Альтернативными способами очистки газов являются:

1. Рукавные фильтры (обладают высоким динамическим сопротивлением, которое растет по мере набора пыли и трудно регенерируются);
2. Циклоны и механические сепараторы (позволяют хорошо улавливать крупные частицы, но имеют низкую степень очистки для мелких частиц);
3. Мокрые скрубберы (имеют большой расход воды и относительно высокое гидравлическое сопротивление).

6.2. Принципиальная схема электрофильтра

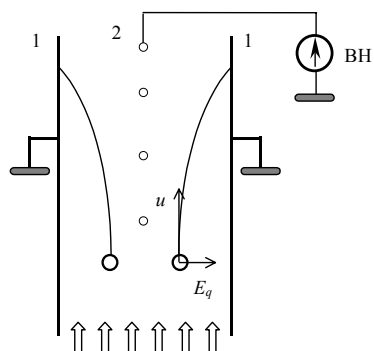


Рис. 6.1. Принципиальная схема электрофильтра

1 — осадительные электроды;
2 — коронирующие электроды

Принципиальная схема электрофильтра представлена на рис. 6.1. Между двумя плоскими осадительными электродами расположен ряд коронирующих проводов. В промежуток между коронирующими и осадительными электродами поступает запыленный газ. В поле коронного разряда, возникающего при подаче высокого напряжения на провода, частицы заряжаются и под действием поля движутся к осадительным плоскостям, с которых они периодически удаляются. Таким образом, концентрация взвешенных частиц по мере прохождения через электрофильтр постепенно уменьшается.

6.3. Степень очистки газов в электрофильтре

Степень очистки газа в электрофильтре является основной характеристикой эффективности его работы. Она определяется содержанием пыли или жидких частиц в газе до поступления в электрофильтр

и после выхода из него:

$$\eta = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}},$$

где $Z_{\text{вх}}$ – концентрации пыли на входе в электрофильтр; $Z_{\text{вых}}$ – концентрация пыли на выходе из электрофильтра.

Осаждение частиц происходит из области, непосредственно примыкающей к электроду. Убыль частиц в этой области восполняется за счет дрейфа частиц в электрическом поле и за счет увлечения их турбулентными потоками.

Так как течение газа в электрофильтре всегда турбулентное, то именно оно способствует выравниванию распределения концентрации частиц в межэлектродном промежутке.

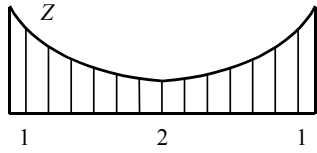


Рис. 6.2 Распределение концентрации в межэлектродном промежутке

1 – осадительные электроды;
2 – коронирующие электроды

В результате действия всех факторов: дрейфа частиц в поле, осаждения частиц на электродах и турбулентных пульсаций в межэлектродном промежутке устанавливается определенное распределение концентрации (рис. 6.2). Будем считать, что закон распределения концентрации частиц не меняется по длине электрофильтра, а уменьшается лишь абсолютное значение концентрации.

Степень очистки определяется средней по сечению концентрацией пыли, которую мы обозначим Z_x , где за координату x принимается расстояние от входа в электрофильтр до рассматриваемого сечения.

Количество осаждаемой пыли определяется концентрацией пыли у осадительного электрода $Z_{\text{ос}}$

Так как мы приняли, что закон распределения концентрации неизменен по длине электрофильтра, то $Z_{\text{ос}}/Z_x = \chi$ есть величина постоянная на любом

удалении от входа в электрофильтр.

Масса пыли g , содержащаяся в объеме межэлектродного промежутка длиной dx , отстоящем от входа в электрофильтр на расстоянии x , равна:

$$g = Z_x 2bHdx$$

где H – расстояние между осадительными электродами, b – ширина осадительного электрода.

Уменьшение массы пыли за счет осаждения за время $d\tau$ на поверхность электродов площадью $2b dx$ будет равна:

$$dg = -Z_{\text{ос}} 2b v dx d\tau,$$

где v – скорость дрейфа под действием поля у поверхности осадительного электрода.

Объединяя записанные соотношения, получаем:

$$\frac{dg}{g} = -\frac{Z_{\text{ос}}}{Z_x} \frac{2b}{2b} \frac{v dx d\tau}{H dx} = -\chi v \frac{d\tau}{H},$$

или
$$\frac{dZ_x}{Z_x} = -\chi v \frac{d\tau}{H}.$$

После интегрирования последнего дифференциального уравнения, учитывая, что $d\tau = dx/u$ получаем:

$$Z_{\text{вых}} = Z_{\text{вх}} \exp\left(-\frac{\chi v l}{uH}\right),$$

где l – длина электрофильтра, а u – скорость газа в электрофильтре.

Таким образом, степень очистки газа электрофильтром равна:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\chi v l}{uH}\right)$$

Для повышения эффективности улавливания пыли необходимо с одной стороны увеличивать скорость движения частиц к осадительному электроду и длину электрофильтра, а с другой стороны уменьшать скорость газового потока и ширину межэлектродного расстояния.

Если мы имеем дело с полидисперсным составом пыли (частицы разного размера), то расчеты ведутся по каждой фракции в отдельности, а затем интегральная степень очистки определяется как сумма средневзвешенных степеней очистки отдельных фракций:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i g_i,$$

где g_i – доля i -ой фракции.

Скорость движения частиц к осадительному электроду (скорость дрейфа частиц) определяется главным образом действием электрических сил. Поэтому, как было показано в первой части, установившаяся скорость движения частиц может быть записана в виде:

$$v = \frac{qE}{6\pi\mu a},$$

для $\alpha > 1$ мкм $q \sim C_1 a^2 E$ или $v \sim a E^2$.

Из полученного соотношения следует, что в первую очередь в электрофильтре осаждаются крупные частицы, а затем мелкие, у которых скорость дрейфа мала.

Квадратичный характер зависимости скорости от напряженности поля свидетельствует о целесообразности работы электрофильтра на предельно возможных напряжениях, что очевидно, соответствует предпробивному режиму.

При этом предпочтительнее работать на отрицательной полярности питающего напряжения, т.к. при этом коронный разряд более устойчивый, а пробивное напряжение значительно выше.

6.4. Влияние концентрации дисперсной фазы на характеристики коронного разряда и процесс очистки газа электрофильтрами

При наличии дисперсной фазы в межэлектродном промежутке суммарный объемный заряд будет определяться уже не только объемным зарядом ионов, а и объемным зарядом заряженных частиц, находящихся в промежутке. При определенной концентрации дисперсной фазы объемный заряд частиц становится соизмеримым с объемным зарядом ионов и начинает существенным образом влиять на процессы развития разряда. Система уравнений описывающая процессы в межэлектродном промежутке может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \operatorname{div} E = (\rho_i + \rho_p) / \epsilon_0, \\ \operatorname{div}(J_i + J_p) = 0, \\ J_i = k \rho_i E, \\ J_p = \rho_p (qBE + u), \\ \operatorname{grad} \phi = -E \end{cases}$$

где u – средняя скорость движения газовой среды, индексы i и p относятся соответственно к ионам и частицам.

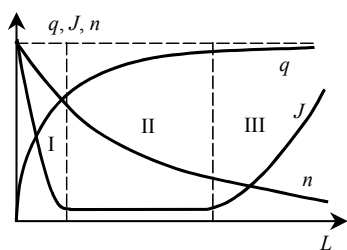


Рис.6.3. Изменение тока, концентрации и заряда частиц по длине электрофильтра

Так как подвижность ионов $k \gg Bq$, ток определяется в основном ионной составляющей. Объемный заряд частиц играет роль отрицательной обратной связи. Частицы пыли в поле коронного разряда приобретают заряд того же знака, что и знак короны. Подвижность заряженных частиц пыли мала по сравнению с подвижностью ионов. Заряженные частицы пыли создают собственное электрическое поле, вектор которого направлен встречно полю ионов коронного разряда, и это обстоятельство заставляет ионы замедлять свое движение от коронирующего электрода к осадительному электроду. Кроме того, электрическое поле объемного заряда частиц пыли снижает напряженность электрического поля на поверхности коронирующего электрода и тем самым уменьшает ток коронного разряда. В результате ток короны значительно уменьшается. Это явление – уменьшение тока короны – называется запирающим током короны. При этом, как следствие, ухудшается зарядка частиц пыли. Изменение плотности ионного тока, концентрации частиц и их среднего заряда по длине электрофильтра, представленное на рис.6.3, наглядно демонстрирует процесс запирающего коронного разряда при высоких входных концентрациях дисперсной фазы.

На представленном рисунке можно выделить три характерные зоны. В зоне I происходит сравнительно быстрая зарядка частиц до заряда, при котором ток из-за запирающего коронного разряда падает практически до нуля. Концентрация частиц из-за кратковременности этой стадии изменяется незначительно. В зоне II из-за осаждения частиц концентрация уменьшается, что приводит к частичному отпирающему тока короны и медленной подзарядке частиц, такой, что плотность объемного заряда частиц всегда остается близкой к запирающей. При приближении заряда к предельному скорость зарядки резко уменьшается. Начиная с этого момента (зона III электрофильтра) уменьшение концентрации не может быть скомпенсировано увеличением заряда частиц и коронный разряд постепенно отпирается, что сопровождается ростом тока.

6.5. Формирование слоя частиц на электроде и возникновение обратного коронного разряда

Сопротивление пыли, которая улавливается электродами, может изменяться в очень широких пределах, что в свою очередь существенно влияет на процесс улавливания пыли. Условно пыль разделяют на три группы по уровням удельного сопротивления.

К первой группе относится хорошо проводящая пыль, имеющая удельное сопротивление $\rho_v \leq 10^2$ Ом·м. Пыль первой группы улавливается плохо, так как при осаждении частицы быстро перезаряжаются, отталкиваются от электрода и уносятся потоком газа.

К пыли второй группы относят пыль, удельное объемное сопротивление которой лежит в пределах $10^2 < \rho_v < 10^8$ Ом·м. Пыль второй группы улавливается хорошо в электрофильтрах. Заряд частиц пыли равномерно стекает на осадительный электрод по мере осаждения новых частиц и подхода к слою ионов. Таким образом частицы хорошо удерживаются на поверхности слоя в процессе пылеулавливания.

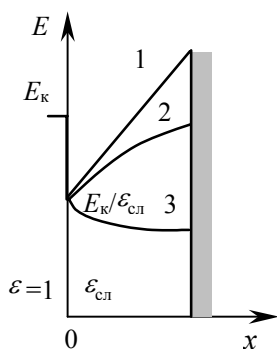


Рис. 6.4. Распределение напряженности поля внутри порошкового слоя для

- 1 – диэлектрических;
- 2 – полупроводящих;
- 3 – проводящих частиц

К пыли третьей группы относится пыль с удельным объемным сопротивлением $\rho_v \geq 10^8$ Ом·м. Эта пыль наиболее трудно улавливается из-за возникновения обратной короны. Частицы, осевшие на осадительный электрод, долго сохраняют свой заряд из-за высокого сопротивления частиц пыли. Заряды, содержащиеся в слое, определяют распределение напряженности электрического поля в слое.

На рис. 6.4 представлены три характерных случая распределения напряженности поля внутри слоя частиц в зависимости от их проводимости.

Посмотрим, как изменяется напряженность электрического поля в слое для заряженных диэлектрических частиц. По уравнению Пуассона:

$$\operatorname{div} E = \rho / \varepsilon_{\text{сл}} \varepsilon_0.$$

Для одномерного случая

$$\frac{dE}{dx} = \rho / \varepsilon_{\text{сл}} \varepsilon_0.$$

Разделяем переменные и интегрируем:

$$\int_{E_k/\varepsilon_{\text{сл}}}^E dE = \frac{\rho}{\varepsilon_{\text{сл}} \varepsilon_0} \int_0^x dx$$

Решением является: $E = E_k/\varepsilon_{\text{сл}} + \rho x/(\varepsilon_{\text{сл}} \varepsilon_0)$. То есть получили линейную зависимость от координаты x .

Итак, для диэлектрических и полупроводящих частиц по мере роста толщины слоя напряженность растет и может даже существенно превысить внешнюю напряженности поля, несмотря на то, что $\varepsilon_{\text{возд}} < \varepsilon_{\text{сл}}$. В газовых включениях, имеющих внутри слоя, начинаются ионизационные процессы, которые приведут к пробое всего слоя. В результате пробоя образуется кратер, порошок из которого выбрасывается в межэлектродный промежуток. После пробоя слоя вокруг кратера начинается также разряд по поверхности, который снимает поверхностный заряд. В результате этих ионизационных процессов начинается эмиссия ионов противоположного знака в межэлектродный промежуток. Это явление носит название обратного коронного разряда. Установлено, что пробой слоя наступает при $\rho_v > 10^8 \div 10^9$ Ом·м. Это соотношение принято считать критерием возникновения обратного коронного разряда.

Время возникновения обратного коронного разряда легко определить из условия зарядки слоя без учета утечек зарядов через слой.

$$E_{\text{сл}} \varepsilon_{\text{сл}} - E_k = \sigma / \varepsilon_0,$$

где $E_{\text{сл}}$ – напряженность в слое частиц, E_k – напряженность поля коронного разряда у поверхности слоя.

Учитывая, что $\sigma = Jt$, получим при возникновении обратной короны:

$$E_{\text{пр сл}} \varepsilon_{\text{сл}} - E_k = J t_{\text{ок}} / \varepsilon_0,$$

где $E_{\text{пр сл}}$ – пробивная напряженность в слое частиц, $t_{\text{ок}}$ – время возникновения обратного коронного разряда.

Время возникновения обратного коронного разряда будет равно:

$$t_{\text{ок}} = 2 \varepsilon_{\text{сл}} \varepsilon_0 (E_{\text{пр сл}} - E_k / \varepsilon_{\text{сл}}) / J.$$

Здесь введен поправочный коэффициент равный 2, который учитывает переход от начальной формы к интенсивному обратному коронному разряду, оказывающему существенное влияние на процессы в электрофилт্রে.

Наличие обратного коронного разряда отрицательно влияет на процесс очистки газа в электрофилт্রে в силу следующих причин:

1. Из-за появления в межэлектродном промежутке объемного заряда противоположного знака снижается напряженность поля у поверхности осадительного электрода;

2. Происходит частичная разрядка и даже перезарядка частиц порошка приближающихся к осадительному электроду;

3. Усиливается вторичный унос частиц с поверхности слоя в результате их перезарядки.

При интенсивном обратном коронном разряде процесс осаждения может полностью прекратиться. Наибольшее распространение получили три способа борьбы с этим вредным явлением:

1. Кондиционирование топочных газов, например, введением аммиака, приводит к снижению удельного объемного сопротивления ниже критического уровня;

2. Импульсное питание коронирующих электродов, снижающее поток ионов к поверхности слоя. Уменьшение плотности тока приводит к замедлению нарастания напряжения на слое и, следовательно, к уменьшению вероятности возникновения обратной короны;

3. Знакопеременное питание электрофилтра позволяет изменять полярность постоянного напряжения на коронирующих электродах электрофилтра на противоположную в момент, когда напряжение на слое приблизится к напряжению возникновения обратной короны. Таким образом, на осадительном электроде формируется общий слой пыли, состоящий из тонких противоположно заряженных слоев пыли, что в конечном итоге снижает напряженность электрического поля в слое пыли и уменьшает вероятность возникновения обратной короны.

6.6. Конструкция электрофилтров

Используются электрофилтры имеют различной конструкции. Они бывают трубчатые (рис 6.5, а) и пластинчатые (рис 6.5, б).

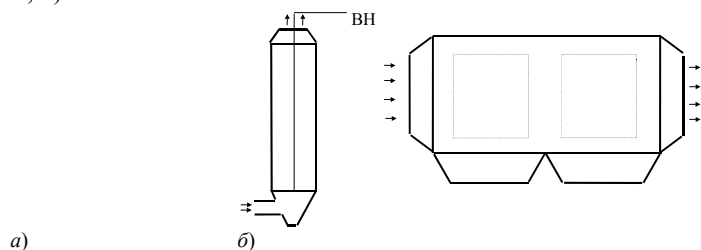


Рис. 6.5. Конструкции электрофилтров
а) трубчатый, б) пластинчатый многопольный

Трубчатые электрофилтры – аппараты с вертикальным потоком газа. Подлежащие очистке газы проходят внутри трубчатых осадительных электродов, по оси которых располагаются коронирующие провода. Слой пыли периодическим встряхиванием электродов удаляется в пылесборник, находящийся в нижней части электрофилтра.

Пластинчатые электрофилтры – аппараты с осадительными электродами в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Между пластинами расположены коронирующие электроды, укрепленные на рамах. В одном корпусе электрофилтра может быть расположено несколько независимых последовательно расположенных систем электродов, или, как принято их называть в практике газоочистки, электрических полей.

Огромную роль в достижении максимальной эффективности пылеулавливания играет конструктивное исполнение коронирующих и осадительных электродов.

Коронирующие электроды можно разделить на две группы (рис. 6.6). К первой группе относятся электроды, которые не имеют фиксированных коронирующих точек. При отрицательной короне – отрицательной полярности коронирующих электродов – светящиеся точки располагаются вдоль электрода на разных расстояниях друг от друга в зависимости от состояния поверхности электрода. Типичные виды электродов этой группы: круглый диаметром 2÷4 мм, квадратный со стороной 3÷4 мм и штыкового сечения, вписывающийся в квадрат со стороной 4÷5 мм (рис. 6.6, а).

Ко второй группе относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. Типичными видами этих электродов являются колючая проволока, пилообразные и игольчатые электроды (рис. 6.6, б). Электроды второй группы при равных напряжении и межэлектродном расстоянии обеспечивают значительно больший ток короны, чем электроды первой группы. Легче обеспечивается необходимая механическая прочность. В настоящее время получили широкое распространение коронирующие электроды ленточно-игольчатого типа. Они легко изготавливаются путем штамповки и при наличии достаточной механической прочности обладают хорошими электрическими характеристиками.

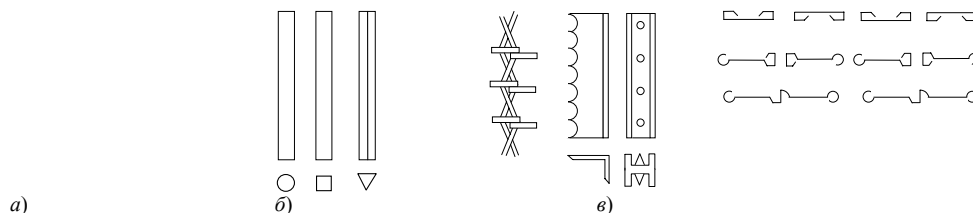


Рис.6.6. Электроды электрофилтров

а) – гладкие коронирующие электроды; б) – коронирующие электроды с фиксированными точками разряда; в) – осадительные электроды

Осадительные электроды электрофилтров также имеют разнообразную форму: они имеют гладкую поверхность без острых углов, необходимую для обеспечения высокой напряженности электрического поля, и полости, позволяющие стряхивать пыль с минимальным вторичным уносом (рис. 6.6, в).

Для успешной работы электрофилтров имеет важное значение установка коронирующих проводов точно по оси между осадительными пластинами. До настоящего времени применялись аппараты с расстоянием между осадительными электродами 275 мм. Шаг между коронирующими проводами составляет 100÷200 мм. Имеется тенденция к увеличению расстояния между осадительными электродами до 450 мм и даже до 600 мм. Опытные промышленные испытания таких электрофилтров показали, что, несмотря на предсказания теории, снижение степени очистки не происходит, так как существенно возрастает пробивное напряжение промежутков.

7. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

7.1. Электроокраска

Окраска изделий является одним из технологических процессов, при котором применение электрического поля эффективно. Принципиально технология электроокраски заключается в распылении и зарядке частиц краски и

осаждении заряженных частиц краски на изделии в электрическом поле. В результате на изделии формируется равномерный тонкий слой краски.

Преимущества при окраске в электрическом поле по сравнению с пневматической окраской заключаются в:

- 1) уменьшении потерь краски до 10÷20% вместо 50÷70%;
- 2) уменьшении загрязнений окружающей среды;
- 3) повышении адгезии покрытия к поверхности изделия.

Процесс распыления жидкости в электрическом поле происходит следующим образом (рис. 7.1).

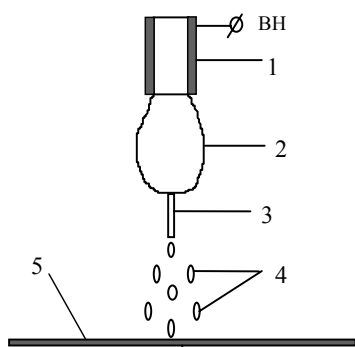


Рис. 7.1. Процесс зарядки и распыления краски

- 1 – сопло распылителя;
- 2 – капля краски;
- 3 – струйка краски;
- 4 – мелкие капли после дробления струйки;
- 5 – изделие

Образующаяся на выходе из распылителя капля растет до тех пор, пока действующие на нее электрические силы не превысят силы поверхностного натяжения. Происходит нарушение устойчивости поверхности на вершине капли где поле максимально и, как следствие, выброс тонкой струйки. Далее эта тонкая струйка дробится на мелкие капли. Выброс тонкой струйки является условием мелкодисперсного распыления жидкости в электрическом поле.

На процесс распыления оказывают наибольшее влияние напряженность поля в непосредственной близости от распылителя, поверхностное натяжение, проводимость, вязкость жидкости, а также расход жидкости, то есть скорость ее поступления в зону распыления.

При малой напряженности поля распыление не происходит, так как электрическая сила недостаточна, чтобы преодолеть силу поверхностного натяжения. От распылителя отрываются крупные капли под действием своего веса. Для увеличения напряженности электрического поля стремятся уменьшить радиус закругления кромок сопла распылителя ($E_{\text{кромки}} \geq 10 \text{ кВ/см}$).

Если поверхностное натяжение велико, то возможно, что раньше, чем произойдет нарушение устойчивости поверхности капли, начнется коронный разряд, препятствующий дальнейшему увеличению напряженности поля у поверхности

капли. Коэффициент поверхностного натяжения краски не должен превышать $(4 \div 5) \cdot 10^6 \text{ Н/см}$.

Проводимость краски оказывает решающее влияние на процесс накопления заряда на капле жидкости. Жидкость с очень малой электрической проводимостью (менее 10^{-8} 1/Ом·м) не распыляется в электрическом поле. Чем выше проводимость, тем быстрее подтекает заряд и больше сила, воздействующая на каплю. Однако при увеличении проводимости выше 10^{-2} 1/Ом·м распыление краски опять прекращается. Это связано с возникновением коронного разряда на капле и внедрением в промежуток большого объемного заряда, снижающего напряженность электрического поля на кромке сопла распылителя. Оптимальная проводимость краски лежит в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ 1/Ом·м}$.

Очень вязкие жидкости также плохо распыляются в электрическом поле, поскольку вязкость жидкости ограничивает возможность выброса тонкой нити. С увеличением вязкости растет диаметр нити и соответственно размер капель, на которые она дробится. Вязкость краски должна быть не более 0,07 Па·с. Оптимальный размер частиц краски составляет 15÷30 мкм.

В промышленности применяются две системы окраски: электростатическая (лотковые и щелевые распылители) и окраска с механическим распылением (центробежные, гидравлические и пневматические распылители) (рис. 7.2).

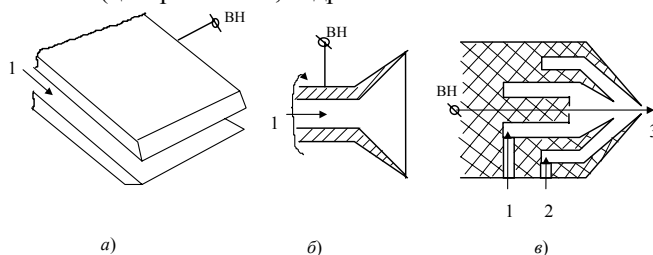


Рис. 7.2. Конструкции электроокрасочных распылителей.

- а) лотковый; б) центробежный; в) электропневматический

Подача: 1 – краски; 2 – воздуха; 3 – коронирующий электрод.

Электростатическая окраска заключается в зарядке и распылении жидкости за счет электрических сил, действующих на каплю, находящуюся на кромке распылителя.

В системах с механическим распылением используются центробежное, пневматическое, безвоздушное (при подаче под большим давлением) дробление краски. В этих распылителях электрическое поле используется только для перемещения и осаждения капель на изделие. Наибольшее распространение получили электропневматические распылители, которые обладают большей производительностью, лучше окрашивают полости и углубления в деталях, не предъявляют жестких требований к параметрам краски. Из-за наличия потоков воздуха потери краски несколько больше, чем у электростатических распылителей (20% вместо 5÷10%), но существенно меньше, чем у пневматических распылителей.

7.2. Нанесение порошковых покрытий

Процесс нанесения порошковых полимерных материалов в электрическом поле заключается в зарядке частиц порошка, переносе их потоками воздуха к напыляемому изделию, осаждении частиц под действием электрического поля на поверхность изделия и оплавлении слоя порошка в электропечах с образованием сплошного полимерного покрытия на поверхности изделия.

Достоинства метода:

- 1) почти 100% использование материала после улавливания неосевшего на изделие порошка и повторного его применения при напылении покрытия;
- 2) незначительное количество растворителей в материале краски (не более 5%) по сравнению с жидкими красками, где растворителя содержится до 50%, а значит существенно меньшее загрязнение окружающей среды газовыми выбросами;
- 3) получение покрытий с уникальными свойствами (фторопласт, полиамид, полиуретан);
- 4) получение толстых покрытий (до нескольких миллиметров) на изделиях сложной формы (для изоляционных конструкций и в химической промышленности).

Зарядку частиц порошкового материала в установках для напыления осуществляют, используя следующие два метода: ионную зарядку – осаждение ионов из объема газа с полем коронного разряда и статическую электризацию – обмен зарядами между частицами и между частицами и элементами конструкции распылителя при контакте между ними.

Для используемых при нанесении покрытий порошковых материалов с радиусами частиц $a > 1$ мкм ионная зарядка происходит преимущественно за счет движения ионов коронного разряда в электрическом поле и осаждения их на поверхность частиц («ударная зарядка»). Статическая электризация осуществляется путем обмена зарядами за счет разности в работе выхода электронов у материала частиц и материала стенок в зарядном устройстве или при обмене зарядами между частицами из-за различий в химическом составе примесей, температуре, фазовом состоянии, структуре поверхности и т.д. На практике для оценки знака зарядов статической электризации используют правило Козна, в соответствии с которым при приведении в контакт и разъединении двух диэлектриков вещество с наибольшей относительной диэлектрической проницаемостью заряжается положительно.

Существуют два варианта устройств для нанесения порошковых полимерных покрытий в электрическом поле: с помощью распылителей (рис. 7.3) и с помощью камер с электрическим кипящим слоем (рис. 7.4).

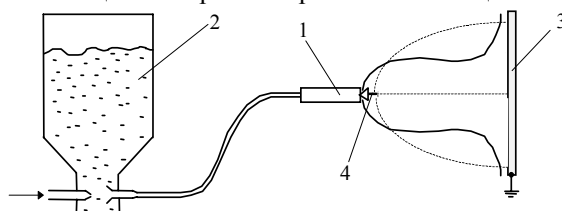


Рис. 7.3. Нанесение покрытия с помощью распылителя

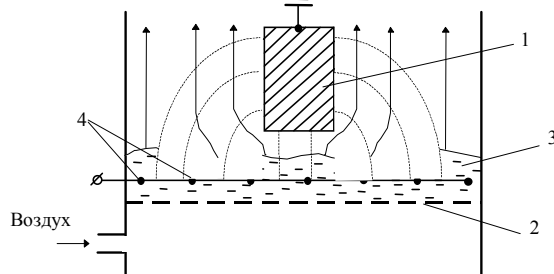


Рис. 7.4. Нанесение покрытия в камере с кипящим слоем

При нанесении покрытий распылителем (рис. 7.3) порошковый материал забирается из загрузочного бункера (2) дозирующим эжектором и во взвешенном состоянии в потоке воздуха по гибкому трубопроводу подается к распылителю (1), который выполняет две функции: формирует порошковое облако вокруг изделия и осуществляет зарядку частиц порошка. Зарядка частиц осуществляется в поле коронного разряда между иглой (4), которая соединена с источником постоянного напряжения, и заземленным изделием (3). Если частицы приобретают избыточный заряд внутри корпуса распылителя, то он называется распылителем с внутренней зарядкой. Зарядка может осуществляться как в поле коронного разряда, создаваемого внутри корпуса распылителя, так и путем статической электризации частиц порошка при трении о внутренние стенки полостей в корпусе распылителя (который в этом случае называется трибоэлектрическим распылителем).

При осуществлении зарядки частиц в поле коронного разряда внутри корпуса распылителя должны учитываться следующие два фактора: запирающее действие коронного разряда ионами, осевшими на внутренние стенки камеры, в которой создается коронный разряд, и осаждение заряженных частиц порошка на заземленный электрод зарядного устройства, что приводит к возникновению обратного коронного разряда в образующемся слое порошка на электроде и к ухудшению зарядки частиц порошка.

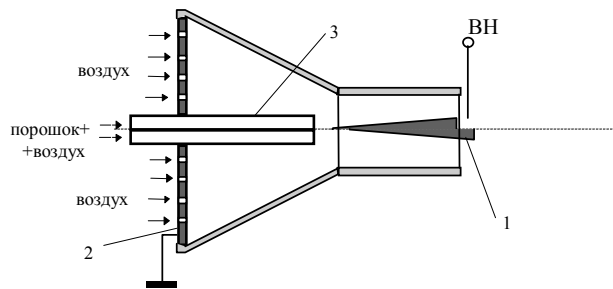


Рис. 7.5. Распылитель с внутренней зарядкой

На рис. 7.5 показано зарядное устройство, в котором неблагоприятные факторы решаются, во-первых, увеличением объема межэлектродного пространства и, во-вторых, созданием дополнительных воздушных потоков через пористый заземленный электрод – 2, препятствующих осаждению частиц на некоронирующий электрод. Кроме того, поток порошкового материала, подающийся в поле коронного разряда по диэлектрической трубке – 3, обжимается чистым потоком воздуха и направляется узкой струей на кончик коронирующей иглы – 1, способствуя приобретению частицами порошка зарядов в области с высокой напряженностью электрического поля.

Зарядные устройства трибоэлектрических распылителей должны удовлетворять следующим трем условиям необходимым для эффективной зарядки напыляемого материала:

- обеспечивать многократные и эффективные соударения частиц порошка с трибоэлектризующим элементом;
- производить снятие поверхностного заряда с трибоэлектризующего элемента;
- обеспечивать стабильность процесса трибозарядки.

Увеличение числа и эффективности актов соударения частиц с поверхностью зарядного устройства достигается турбулизацией несущего частицы потока воздуха, изменением направления его движения и увеличением скорости потока, а также подбором материала трибоэлектризующего элемента по отношению к материалу наносимого порошка. Часто трибоэлектризующие устройства выполняются в виде изогнутых трубок, спиралей, винтовых каналов в цилиндре, электродов и т.д. Трибоэлектризующий элемент обычно выполняется из диэлектрического материала. В связи с этим при работе на поверхности трибоэлектризующего элемента накапливается заряд по знаку противоположный заряду частиц, что ухудшает эффективность статической электризации. Снятие поверхностного заряда с внутренней поверхности каналов достигается или введением заземленного цилиндрического электрода с малым радиусом закругления, или вводом через стенки множества заземленных игл во внутреннюю полость каналов. Стабильность процесса статической электризации обеспечивается поддержанием неизменной влажности осушенного воздуха, используемого для транспортировки порошка, на уровне – 10°С точки росы.

Если зарядка частиц порошка осуществляется в поле коронного разряда, создаваемого между коронирующими электродами, расположенными в области выходного сопла распылителя, и заземленным изделием, то такое устройство называется распылителем с внешней зарядкой. В качестве коронирующих электродов может использоваться одна или несколько игл, коронирующая кромка.

Величина заряда частиц, приобретаемого в поле коронного разряда, определяется предельным зарядом и степенью недозарядки $q = q_m \xi$, где q_m – предельный заряд, определяемый по (5.9), ξ – степень недозарядки из-за

ограниченного времени зарядки. В соответствии с (5.9) $\xi = \frac{en_0 kt}{4\epsilon_0 + en_0 kt} = \frac{Jt}{4\epsilon_0 E + Jt}$, где $J = en_0 kE$ – плотность тока.

Видно, что для увеличения заряда частиц необходимо увеличивать напряженность электрического поля и плотность тока коронного разряда. Наличие заряженного дисперсного материала в промежутке между распылителем и изделием вызывает запыление (уменьшение) тока коронного разряда, а значит увеличивает степень недозарядки частиц. Причем, с увеличением расхода порошка через распылитель степень недозарядки продолжает уменьшаться. Поэтому для улучшения зарядки частиц порошка следует стремиться увеличить плотность тока короны. Однако здесь существует ограничение, связанное с быстрым возникновением обратной короны в слое порошка, осевшем на изделии, которая ухудшает процесс зарядки. В настоящее время считается, что оптимальным значением тока коронного разряда является величина 5÷10 мкА.

Распылители с внешней зарядкой обладают наибольшей эффективностью зарядки порошкового материала, так как время пребывания частиц в поле коронного разряда, по сравнению с другими устройствами, здесь максимально.

Второй вариант устройств для нанесения покрытий представляет собой камеру с электрическим кипящим слоем, в которую помещается изделие – 1 (рис. 7.4). Камера делится пористой перегородкой – 2 на две части. В верхнюю часть на пористую перегородку насыпается порошковый материал – 3, а в нижнюю – подается сжатый воздух.

При определенной скорости воздуха, проходящего через пористую перегородку, порошок переводится во взвешенное состояние, при котором частицы как бы витают в восходящем потоке воздуха. Из-за хаотичности движения частиц происходит их соударение между собой, что приводит к статической электризации частиц и зарядка их как отрицательным, так и положительным зарядом.

Электрическое поле, создаваемое между высоковольтным электродом, размещенным в порошковом слое, и заземленным изделием, вызывает разделение частиц в кипящем слое по знакам заряда. При приложении отрицательного напряжения к высоковольтным электродам положительно заряженные частицы накапливаются вокруг высоковольтного электрода, а отрицательно заряженные – в верхней части кипящего слоя порошка. Частицы, имеющие достаточно большой отрицательный заряд, выносятся электрическим полем из кипящего слоя и направляются к изделию. Из-за

большой концентрации частиц в кипящем слое коронный разряд у поверхности высоковольтных электродов находится в полностью запертом состоянии. По мере накопления положительно заряженных частиц вокруг высоковольтных электродов происходит разряд и импульсное локальное отпирание коронного разряда, при котором осуществляется перезарядка частиц. Таким образом, в электрическом кипящем слое зарядка частиц носит сложный характер, сочетающий статическую электризацию частиц и зарядку в газовом разряде.

Процесс транспортировки частиц порошка к напыляемому изделию осуществляется в потоке воздуха. При этом соотношение аэродинамических и электрических сил, действующих на частицу, сильно отличается для разных устройств, используемых для нанесения покрытий. Если для распылителей с внутренней зарядкой транспортировка частиц осуществляется исключительно потоком воздуха, то в камерах с электрическим кипящим слоем направление движения частиц к изделию создается в основном электрическим полем. Для распылителей с внешней зарядкой перемещение частиц к изделию в равной мере определяется аэродинамическими и электрическими силами.

При осаждении порошка на поверхность изделия, как видно из схем устройств напыления, представленных на рис. 7.3 и 7.4, на частицу действует электрическая сила в направлении к поверхности изделия и аэродинамический поток воздуха, направленный вдоль поверхности, который способствует скорее отрыву частиц, чем осаждению. Электрическое поле у изделия в общем случае является суммой полей от напряжения на высоковольтных электродах и от объемного заряда частиц. Причем напряженность электрического поля объемного заряда порошка может иметь значительную величину, а при большой концентрации частиц даже превышать напряженность поля коронного разряда, достигая значений 10 кВ/см. Для распылителей с внутренней зарядкой электрическое поле у изделия создается исключительно объемным зарядом частиц. Поэтому, с точки зрения увеличения напряженности электрического поля, целесообразным является увеличение расхода порошка через распылитель. Особенно эффективно использовать большой (до 20 кг/ч) расход порошка при нанесении покрытий на изделия сложной формы с внутренними заэкранированными полостями, в которые внешнее поле не проникает. Однако с увеличением расхода порошка эффективность зарядки частиц снижается, а значит уменьшается электрическая сила, действующая на частицу, что приводит к снижению потока частиц, осаждающихся на поверхность изделия.

Интенсивность процесса осаждения обычно характеризуется величиной плотности потока массы порошка

$$F = m/St,$$

где m – масса порошка, осевшего на поверхность изделия площадью S ; t – время напыления.

В результате снижения потока частиц коэффициент осаждения порошка на изделие уменьшается. Коэффициент осаждения определяется как доля порошкового материала, осаждаемого на изделие, по отношению к общему расходу материала через распылитель.

По мере нарастания толщины слоя порошка на поверхности изделия напряженность электрического поля в слое возрастает до пробивных значений. Возникающие разрядные явления в слое порошка носят название «обратный коронный разряд». Время возникновения обратной короны находится из условия накопления заряда в слое и вычисляется по формуле:

$$t_{ок} = 2\varepsilon_{сл}\varepsilon_0 \frac{E_{пр}}{J}.$$

Здесь $\varepsilon_{сл}$ – относительная диэлектрическая проницаемость порошкового слоя, вычисляемая по формуле: $\varepsilon_{сл} = \varepsilon^k$, где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала напыляемого порошка; k – коэффициент упаковки, характеризующий пористость слоя, равен отношению толщины оплавленного покрытия к толщине неоплавленного слоя:

$$k = h_{опл}/h_{сл} = m/h_{сл}S\gamma,$$

где γ – плотность материала порошка.

Так как в полученном выражении для времени возникновения обратной короны пробивная напряженность слоя $E_{пр}$ зависит от плотности тока на изделие, была получена другая формула для времени возникновения обратного коронного разряда

$$t = \begin{cases} 40\varepsilon_{сл}J^{-0,68} & \text{при } J < 125 \text{ мкА/м}^2 \\ 72\varepsilon_{сл}J^{-0,8} & \text{при } J > 125 \text{ мкА/м}^2 \end{cases}$$

где J в мкА/м², t в секундах.

При обратном коронном разряде из порошкового слоя внешним электрическим полем в пространство над слоем порошка вытягиваются ионы, противоположные по знаку зарядам осаждающихся частиц. Ионы обратной короны разряжают подлетающие к изделию частицы, в результате падает плотность потока массы порошка, осаждающегося на изделие, и замедляется рост толщины слоя (рис. 7.6.). При обработке экспериментальных результатов, полученных разными авторами, установлено, что спад плотности потока массы после возникновения обратной короны соответствует экспоненциальному закону:

$$F = F_0 \exp \frac{-(t-t_{ок})}{\tau},$$

где F_0 – плотность потока массы до возникновения обратной короны; $\tau = 1,2t_{ок}$ – эквивалентная постоянная времени.

Полученное выражение позволяет определить плотность потока массы порошка, осаждающегося на изделие, для любого момента времени вплоть до бесконечно

больших значений времени, когда существует развитая обратная корона и практически прекращается осаждение порошка на изделие.

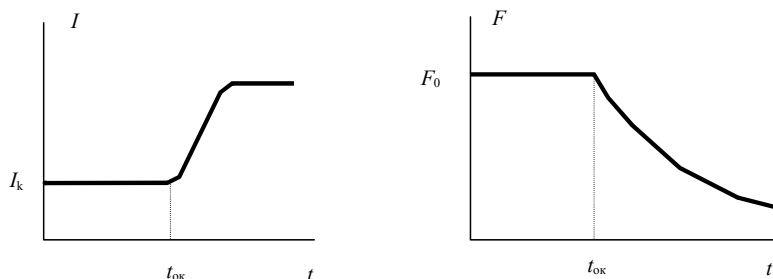


Рис.7.6. Зависимость тока и плотности потока осаждающихся на изделие частиц наносимого порошка от времени напыления

Кроме того, появление развитого обратного коронного разряда вызывает образование кратеров в порошковом слое, что ухудшает качество получаемого оплавленного покрытия. Исходя из этого, было определено время нанесения покрытия, при достижении которого еще не происходит заметного снижения осаждения порошка на изделие и ухудшения качества конечного покрытия. Рациональное время напыления равно:

$$t_{\text{рац}} = t_{\text{ок}} + 0,5\tau = 1,6 t_{\text{ок}}.$$

Зная рациональное время напыления и зависимость для плотности потока массы, интегрированием вычисляется масса осевшего порошка и при известной плотности материала определяется толщина получаемого качественного оплавленного покрытия:

$$h_{\text{опл}} = 1,47 F_0 t_{\text{ок}} / \gamma.$$

Отличие при нанесении порошковых покрытий распылителями с внешней зарядкой состоит в том, что по сравнению с распылителями с внутренней зарядкой и камерами с электрическим кипящим слоем в факеле распыленного порошка присутствуют как заряженные частицы, так и газовые ионы, создаваемые при коронном разряде. Поэтому, как только на поверхности изделия образуется сплошной порошковый слой, сразу происходит его подзарядка ионами, движущимися к изделию под действием электрического поля. Подзарядка слоя током коронного разряда существенно сокращает время образования обратной короны, что ограничивает качественное прокрашивание заэкранированных участков изделия сложной формы.

Одним из путей уменьшения подзарядки слоя порошка током коронного разряда является согласование распределения концентрации частиц в факеле распыленного порошка с плотностью тока коронного разряда на поверхности изделия (рис. 7.7). Видно, что при согласованном факеле наблюдается примерно одинаковая плотность тока коронного разряда по всему отпечатку факела на поверхности изделия, и отсутствуют участки с повышенной подзарядкой током прямой короны.

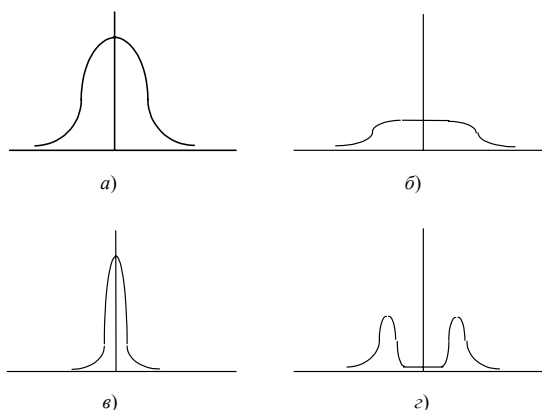


Рис. 7.7. Распределение плотности тока по отпечатку факела при

- а) отсутствии подачи порошка через распылитель;
- б) согласованном факеле порошка;
- в) широком факеле; г) узком факеле порошка

8. ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИЯ

8.1. Классификация сепараторов

Электрическая сепарация минерального сырья представляет собой процесс разделения сыпучих смесей веществ по физическому составу, крупности или форме с использованием энергии электрического поля. Электрическая сепарация используется для двух целей: электрического обогащения и электрической классификации. Электрическое обогащение – процесс разделения смесей веществ по их физическим свойствам. Электрическая классификация – процесс разделения частиц одного вещества по размерам частиц.

Физические закономерности электрического обогащения и классификации имеют общие основы.

Трибоэффект открыл в 600 году до н.э. Фалес Милетский, который обнаружил электризацию янтаря при натирании его мехом или сукном. Однако только в 1881 году был зарегистрирован патент на способ электрического разделения золота и кварца.

Таблица 8.1

Классификация сепараторов				
По способу сепарации:	По электропроводности	Трибо-электростатическая	Пиро-электрическая	Диэлектрическая (по ϵ)
По характеристикам поля в рабочем промежутке:	— электростатическая — коронная — коронно-электростатическая	Электростатическая		
Конструктивные признаки:	— в тонком слое: барабанные, лотковые — в объеме: камерные, с кипящим слоем, флюидизационные, — пневматические дутьевого типа			

В настоящее время осуществляют обогащение: железных, титановых, оловянных и других руд цветных металлов; разделение смеси порошков, различающихся по физическим свойствам.

Классификация осуществляется при разделении асбеста и слюды по форме; алмазных порошков по размерам.

Классификация электросепараторов производится по физическим принципам, составляющим основу процесса разделения, и по конструктивным признакам.

8.2. Сепарация по электропроводности

8.2.1. Барабанные электростатические сепараторы

На барабанных электростатических сепараторах осуществляется разделение сыпучих веществ, имеющих различную удельную электропроводность. На рис. 8.1. представлена конструкция такого сепаратора. Электростатическое поле создается между некоронирующим высоковольтным электродом 3 и заземленным барабаном (осадительным электродом) 2. Частицы разделяемых материалов из дозатора попадают на поверхность вращающегося барабана.

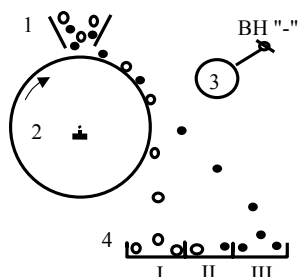


Рис.8.1. Схема барабанного электростатического сепаратора

1 — дозатор, 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод), 3 — некоронирующий высоковольтный электрод, 4 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II.

После перемещения их в зону электростатического поля проводящие частицы в результате контактной зарядки приобретают заряд противоположный по знаку потенциалу высоковольтного электрода. Возникающая при этом сила электрического поля отрывает частицы от поверхности барабана и они попадают в приемник III. Непроводящие частицы не успевают приобрести избыточный заряд и под действием сил тяжести падают в приемник I. В приемник II попадает смесь из проводящих и непроводящих частиц, не прошедших разделение.

Скорость вращения барабана составляет 40÷400 об/мин. Напряженность электростатического поля $E_{эл.ст} = 3÷4$ кВ/см. Производительность сепаратора на погонный метр длины составляет $Q \approx 2$ т/(м·ч). Диаметр сепарируемых частиц находится в диапазоне 100 мкм ÷ 3 мм.

8.2.2. Барабанные коронные сепараторы

Для более эффективного разделения материалов по проводимости стали использовать сепараторы, у которых зарядка частиц осуществляется в поле коронного разряда. Это приводит к появлению заряда на непроводящих

частицах, причем того же знака, что и коронирующий электрод. Значит, возникает электрическая сила, удерживающая эти частицы на поверхности барабана в зоне разделения материалов. Кроме того, непроводящие частицы удерживаются на поверхности барабана силами зеркального отображения вплоть до удаления их с помощью скребка.

В результате разделение проводящих и непроводящих материалов происходит на разных сторонах поверхности барабана, что обеспечивает более селективное отделение проводников от непроводников.

8.2.3. Барабанные коронно-электростатические сепараторы

Наибольшее распространение получили коронно-электростатические сепараторы (рис. 8.3), у которых вслед за коронирующим электродом 3 размещается

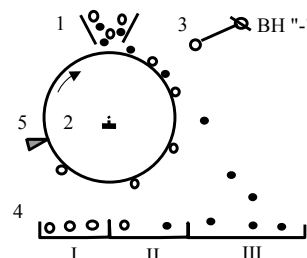


Рис.8.2. Схема барабанного коронного сепаратора

1 — дозатор, 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод), 3 — коронирующий высоковольтный электрод, 4 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II, 5 — скребок.

высоковольтный некоронирующий отклоняющий электрод 4. В этих сепараторах механизм зарядки частиц в зоне коронного разряда аналогичен предшествующему варианту. Введение в рабочую зону дополнительного электростатического поля увеличивает роль электрических сил, способствующих более раннему отклонению проводящих частиц от барабана. Частицы диэлектриков, при прочих равных условиях, удерживаются на большем участке периметра барабана. В результате этого увеличивается разница в траекториях проводящих и непроводящих частиц. Таким образом, электродная система является важнейшим узлом этих сепараторов.

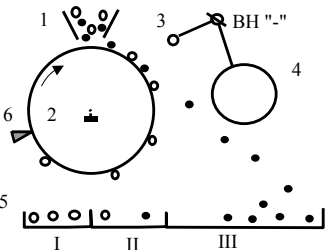


Рис.8.3. Схема барабанного коронно-электростатического сепаратора

1 — дозатор, 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод), 3 — коронирующий высоковольтный электрод, 4 — отклоняющий электрод, 5 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II, 6 — скребки.

Осадительные электроды изготавливают обычно из стальных труб, которые имеют диаметр 125÷350 мм и длину до 2 м. Для уменьшения влияния адгезионных сил поверхность осадительных электродов должна быть гладкой, поэтому ее хромируют и полируют.

Получили распространение два типа коронирующих электродов: проволочные и игольчатые. Проволочные электроды выполняют из нихромовой или вольфрамовой проволоки диаметром 0,25÷0,4 мм. Игольчатые электроды монтируют на несущем стержне на расстоянии 3÷6 мм друг от друга.

Конструкции отклоняющих электродов весьма разнообразны. На рис. 8.4. показаны комбинации проволочного коронирующего электрода и различных отклоняющих электродов.

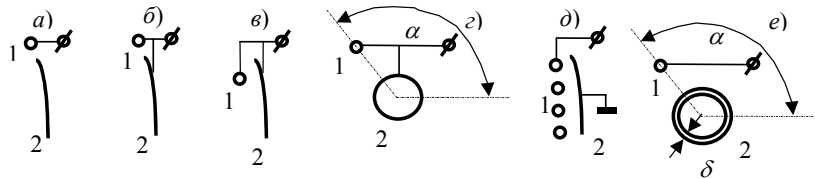


Рис. 8.4. Схемы расположения электродов барабанных коронно-электростатических сепараторов

- а) пластинчатый отклоняющий электрод, заряжаемый от коронирующего,
 - б) пластинчатый отклоняющий электрод, подключенный к коронирующему,
 - в) пластинчатый отклоняющий электрод, подключенный к коронирующему и расположенный за ним,
 - г) цилиндрический отклоняющий электрод, соединенный с коронирующим,
 - д) система с несколькими коронирующими и заземленным отклоняющим электродами,
 - е) цилиндрический отклоняющий электрод, покрытый слоем диэлектрика толщиной δ , заряжаемый от коронирующего.
- 1- коронирующий электрод, 2 - отклоняющий электрод.

Наличие вращающихся деталей и трущихся частей, работающих в запыленной атмосфере, вызывает их быстрый износ. Кроме того, эти сепараторы мало эффективны при разделении тонкоизмельченного материала крупностью ниже 50÷70 мкм вследствие адгезионного взаимодействия минеральных частиц между собой и с поверхностью барабана.

8.2.4. Лотковые наклонные электростатические сепараторы

Данные типы сепараторов нашли широкое применение при разделении титаносодержащих руд. Сепарируемые материалы из бункера 1 (рис. 8.5) попадают на наклонную плоскость, расположенную под углом $20^\circ \div 42^\circ$ к горизонту. Скользя по заземленному лотку сначала в поле коронного разряда, создаваемом между электродами 3 и 2, а затем в электростатическом поле, образуемом электродами 4 и 2, проводящие частицы рутила заряжаются положительно и концентрируются в верхней части слоя. Непроводящие частицы циркона заряжаются отрицательно и концентрируются в нижней части слоя. Электростатическое поле способствует лучшему разделению частиц. Для лучшего разделения частиц минералов под наклонной плоскостью размещают дополнительный отклоняющий электрод 5, на который подают высокое напряжение положительной полярности. На процесс сепарации существенно влияют длина и угол наклона заземленного электрода 2. Для уменьшения влияния адгезионных сил и контактного сопротивления между поверхностью заземленного электрода и частицами пластинчатый электрод изготавливается из графитосодержащего материала. Производительность сепаратора достигает $Q = 3 \text{ т/м} \cdot \text{ч}$.

Для барабанных и лотковых сепараторов удельная электропроводность разделяемых материалов должна отличаться на 2÷4 порядка.

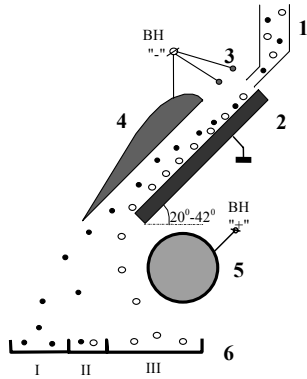


Рис.8.5. Конструкция лоткового наклонного электростатического сепаратора

- 1 — дозатор, 2 — пластинчатый наклонный (осадительный) электрод,
- 3 — коронирующий электрод,
- 4 — отклоняющий электрод,

8.3. Трибоэлектростатическая сепарация

Для разделения материалов, имеющих низкую электропроводность и различающихся трибоэлектрическими зарядами, электризацию частиц производят:

— либо при трении частиц между собой,

— либо при трении частиц о специальную поверхность трибоэлектризующего элемента.

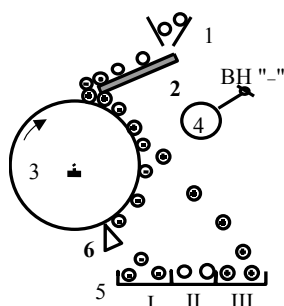


Рис.8.6. Схема барабанного трибоэлектростатического сепаратора

1 — дозатор, 2 — электризирующий элемент,
3 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод),
4 — некоронирующий высоковольтный электрод,
5 — приемник для отрицательно заряженных частиц I.

Барабанные трибоэлектростатические сепараторы.

У представленного на рис. 8.6 барабанного трибоэлектростатического сепаратора зарядка частиц разделяемых материалов осуществляется на наклонной плоскости 2 за счет трибоэлектризации при их контакте с поверхностью плоскости. Подбирая материал плоскости можно регулировать знак заряда, приобретаемый частицами. Кроме того, установлено, что подача на металлическую пластину высокого напряжения положительной или отрицательной полярности (в зависимости от свойств разделяемых материалов) может значительно увеличить трибоэлектрический заряд. Разноименно заряженные частицы поступают в электростатическое поле, создаваемое между электродами 3 и 4, где происходит их разделение. Положительно заряженные частицы под действием электрического поля отрываются от поверхности барабана и попадают в приемник 5 (III). Отрицательно заряженные частицы скребком 6 счищаются в приемник 5 (I).

Камерные электростатические сепараторы свободного падения. После зарядки разделяемый материал поступает из дозатора в зону с электростатическим полем. Поле создается вертикально расположенными некоронирующими электродами. Падая вниз под действием сил тяжести, частицы отклоняются в сторону электродов под действием кулоновских сил.

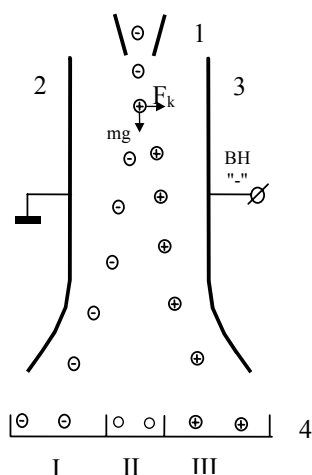


Рис. 8.7. Схема камерного электростатического сепаратора

1 – дозатор, 2 – заземленный электрод,
3 – высоковольтный электрод,
4 – приемник сепарируемых материалов
(I – отрицательно заряженного, II –
незаряженного и III – положительно
заряженного).

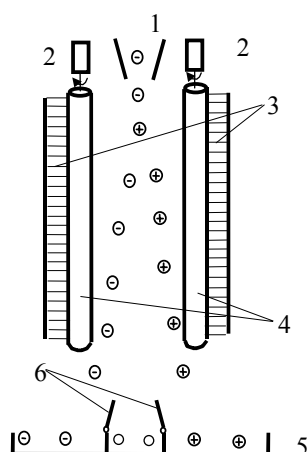


Рис. 8.8. Схема камерного трубчатого электростатического сепаратора

1 – дозатор, 2 – электродвигатель,
3 – щетки для очистки осадительных
электродов 4,
5 – приемник сепарируемых материалов,
6 – отсекающие шиберы

Направление действия электрической силы зависит от знака избыточного заряда частицы. На рис. 8.7 приведена схема камерного электростатического сепаратора. Расширение межэлектродного расстояние в нижней части сепаратора позволяет расширить веер разделяемых материалов и улучшить таким образом их сепарацию. Преимуществом данного типа сепараторов является большая производительность, так как процесс разделения частиц материала осуществляется не на поверхности электрода, а в межэлектродном пространстве. Недостатком данной конструкции является постепенное накапливание слоя частиц в результате осаждения частиц на электроды. При образовании на электроде слоя пыли определенной величины он отваливается от электрода и часть отсепарированного материала попадает в непригодные хвосты.

Для предотвращения накапливания осевших частиц производят очистку осадительных электродов. На рис. 8.8 представлена конструкция камерного электростатического сепаратора фирмы «Кали унд Зальц АГ» (Германия). Осадительные электроды сепаратора представляют собой два ряда параллельно установленных вертикальных

вращающихся вокруг своей оси труб. Они очищаются от налипшей пыли неподвижными щетками, укрепленными параллельно трубам с тыльной стороны. Промышленные сепараторы такого типа имеют рабочую длину электродов 10 м, расстояние между электродами 250 мм. Напряженность электростатического поля $4\div 5$ кВ/см. Удельная производительность сепаратора составляет $10\div 30$ т/(м·ч).

Сепараторы с кипящим слоем (трибоэлектростатические флюидизационные сепараторы).

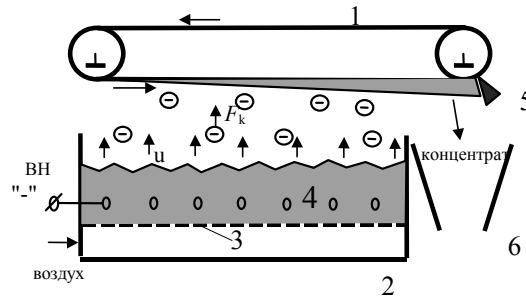


Рис. 8.9. Схема сепаратора с кипящим слоем

1 — транспортер с проводящей заземленной лентой, 2 — ванна с пористой перегородкой 3; 4 — кипящий слой порошка, 5 — скребок, 6 — приемный бункер для концентрата.

Сепаратор состоит из флюидизационной ванны 2 (рис. 8.9), которая имеет пористую перегородку 3 со слоем 4 смеси порошковых материалов, подлежащих сепарации. Через пористую перегородку в ванну подают восходящий поток воздуха и частицы порошка переводятся во взвешенное состояние. Частицы заряжаются при столкновении друг с другом. В ванне на некотором расстоянии от пористой перегородки установлены проволочные электроды, к которым подводится высокое напряжение. Электростатическое поле, создаваемое между высоковольтными электродами и проводящей заземленной лентой транспортера 1, вытягивает из кипящего слоя частицы одного из разделяемых материалов, заряженные тем же знаком, что и потенциал высоковольтных электродов. Осаждаясь на проводящую ленту транспортера, частицы удерживаются силами зеркального отображения вплоть до момента удаления их скребком 5 в бункер для концентрата. Частицы другого из разделяемых материалов, заряженные противоположным зарядом, концентрируются около высоковольтных электродов и периодически разгружаются из ванны через сливные отверстия.

8.4. Пироэлектрическая сепарация

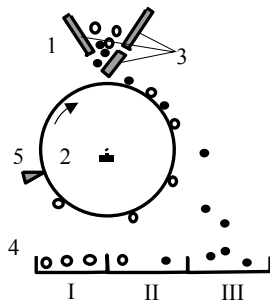


Рис.8.10. Схема барабанного пироэлектрического сепаратора

1 — дозатор, 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод), 3 — электронагреватели, 4 — приемник для электризующихся частиц

Некоторые кристаллические материалы при нагреве и резком охлаждении электризуются.

Для реализации этой зарядки с помощью барабанных сепараторов (рис. 8.10) стенки бункера-дозатора 1 выполнены в виде нагревательных элементов 3. Нагретый материал, попадая на холодную поверхность барабана 2, быстро охлаждается. Кристаллические материалы, склонные к пироэлектризации заряжаются и удерживаются на поверхности барабана силами зеркального отображения вплоть до удаления их скребком 5 в приемник I. Частицы других материалов не заряжаются, отрываются от поверхности барабана и попадают в приемник III.

8.5. Диэлектрическая сепарация

Диэлектрическая сепарация основана на различии в значениях и направлениях пондеромоторных сил, действующих на поляризованные частицы твердых тел в неоднородном электрическом поле. Пондеромоторная сила равна:

$$F = 2\pi\epsilon_0\epsilon_2 a^2 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \text{grad } E^2,$$

где ϵ_1 – относительная диэлектрическая проницаемость частицы, ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость среды, a – радиус сферической частицы, E – напряженность электрического поля.

В диэлектрических сепараторах разделяемый дисперсный материал подают в неоднородное электрическое поле, создаваемое электродами различной конфигурации. Разделение осуществляют в жидкой, реже в воздушной, непроводящей среде. Поведение частиц определяется разностью диэлектрических проницаемостей частицы ϵ_1 и среды ϵ_2 . В том случае, когда $\epsilon_1^{(1)} > \epsilon_2$ частица втягивается в область с наибольшей напряженностью электрического поля; если же $\epsilon_1^{(2)} < \epsilon_2$ частица выталкивается из этой области. Практически для любой пары минералов и других веществ можно подобрать условия, при которых они разделяются.

Рабочее пространство сепараторов заполняют жидкой средой, состоящей из двух смешивающихся компонентов, диэлектрическую проницаемость которой можно регулировать в широких пределах изменением соотношения составных частей. В качестве среды используют смеси: керосин – нитробензол, скипидар – нитробензол, четыреххлористый углерод – метиловый спирт, гексан – ацетон, керосин – диметилформамид и др. Таким образом, удается получить необходимое соотношение между относительными удельными электрическими постоянными среды и частиц.

В диэлектрических сепараторах применяют, как правило, изолированные проволочные электроды, на которые подают высокое напряжение переменной полярности промышленной частоты для исключения зарядки и налипания частиц на электроды.

Конструкции диэлектрических сепараторов разделяют на следующие виды: щелевого типа (провода в диэлектрических пазах); с направляющей плоскостью (диэлектрические пластины с прорезами между плоскими электродами); с пространственным расположением электродов, при сепарации в воздушной среде.

В диэлектрических сепараторах щелевого типа (рис. 8.11.) проволочные электроды 2 монтируют в вертикально установленные диэлектрические пластины 1. При свободном падении в жидкой среде частицы минералов с диэлектрической проницаемостью больше таковой у среды втягиваются в область наибольшей напряженности. Частицы, имеющие диэлектрическую проницаемость меньшую, чем у среды, остаются в области с наименьшей напряженностью электрического поля и осаждаются в жидкости, не отклоняясь к диэлектрическим пластинам.

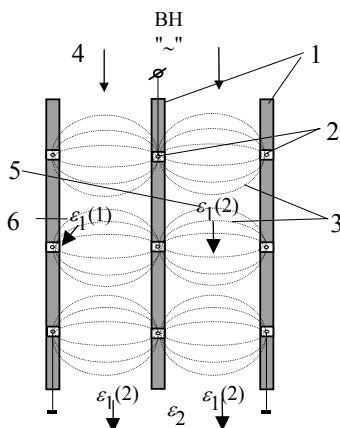


Рис. 8.11. Схема диэлектрического сепаратора щелевого типа (провода в диэлектрических пазах)

- 1 – диэлектрические плоскости,
- 2 – провода в пазах,
- 3 – силовые линии,
- 4 – поток разделяемых частиц,
- 5 – частицы с $\epsilon_1^{(1)} > \epsilon_2$,
- 6 – частицы с $\epsilon_1^{(2)} < \epsilon_2$

9. ЭЛЕКТРОПЕЧАТЬ

9.1. Применение электропечати

Электростатические печатающие устройства используются в качестве устройств копировально-множительной техники, в качестве выводных устройств ЭВМ, в системах автоматизированного проектирования, информационно-измерительных системах, в качестве маркирующих устройств и при нанесении структурных покрытий. В электропечати выделяются два направления: электрофотография и электрокаплеструйная технология. Электрофотографические устройства обеспечивают более высокую скорость и разрешающую способность печати, электрокаплеструйные более просты по устройству и дешевы.

9.2. Электрофотография

В основе электрофотографического способа лежит свойство высокоомного фотополупроводника, нанесенного тонким слоем на подложку, изменять свою электрическую проводимость под действием света.

На первой стадии процесса (рис. 9.1.) производится электризация полупроводника, т.е. на поверхность полупроводникового слоя наносятся электрические заряды того или иного знака. Постоянная времени разряда слоя, определяемая диэлектрической проницаемостью и электрической проводимостью слоя, такова, что заряды удерживаются

на поверхности в течение времени, необходимого для выполнения последующих операций. Электризация проводится при отсутствии освещения.

После электризации производится экспонирование слоя, которое принципиально не отличается от экспонирования обычных фотографических материалов. Оно может производиться в фотографических камерах, а также контактным методом. В процессе экспонирования благодаря фотопроводимости полупроводника уменьшается сопротивление слоя и происходит стекание зарядов с тех участков поверхности, которые подверглись воздействию света. Оставшийся после экспонирования поверхностный заряд образует скрытое электростатическое изображение.

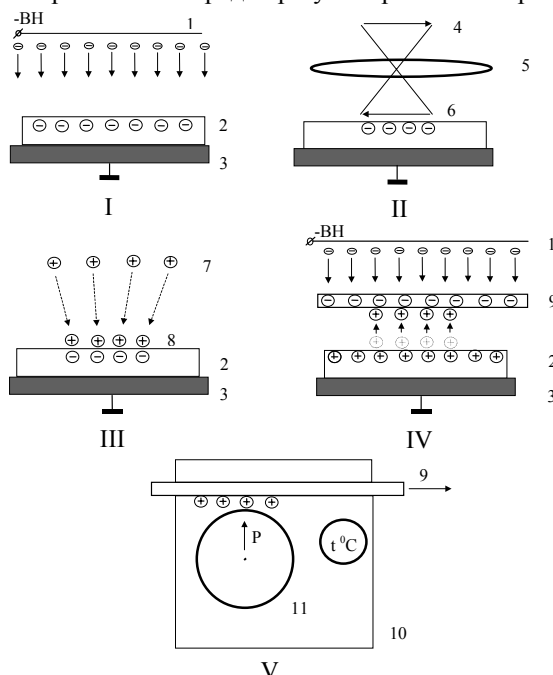


Рис. 9.1. Стадии электрофотографического процесса

I - зарядка; II - экспозиция; III - проявление;

IV - перенос изображения; V - фиксация изображения.

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1 — коронирующие электроды; | 7 — проявляющий порошок; |
| 2 — фотополупроводник; | 8 — порошковое изображение; |
| 3 — заземленный электрод; | 9 — бумага; |
| 4 — оригинал (первичное изображение); | 10 — термокамера; |
| 5 — проекционная система; | 11 — прижимной валик. |
| 6 — скрытое электростатическое изображение; | |

Проявление скрытого электростатического изображения производится с помощью заряженного порошка. Если заряд частиц проявляющего порошка противоположен по знаку остаточному поверхностному заряду, то частицы будут оседать преимущественно в местах с наибольшей плотностью поверхностного заряда. В результате на поверхности полупроводникового слоя образуется порошковое изображение. Электростатическое изображение можно визуализировать не только заряженными порошками, но и непосредственно сканированием потенциального рельефа и превращением его в оптическое изображение на экране электронно-лучевой трубки.

Следующим этапом процесса является перенос слоя на несветочувствительную подложку, например, бумагу. Далее производится фиксация порошкового изображения на бумаге. Обычно на бумагу переносится незначительная часть порошка, что позволяет получать несколько копий с одного изображения на полупроводниковом слое. Наиболее простой и распространенный способ фиксации изображения термический при соответствующем подборе порошка.

Заключительной стадией процесса является очистка полупроводника от остатков порошка.

Из всего разнообразия фотополупроводниковых материалов в электрографии нашли применение оксид цинка и селен. Они в наибольшей мере удовлетворяют предъявляемым требованиям: имеют малую электрическую проводимость ($10^{-13} \div 10^{-14}$ 1/Ом·м), обладают необходимой спектральной чувствительностью, позволяют получать тонкие слои, имеющие достаточную механическую прочность. Широко используются органические полупроводники.

Применяются различные методы получения электрографических слоев. Например, слои оксида цинка получают путем нанесения тонкого слоя суспензии порошка на бумагу и последующего высушивания. Такие слои предназначены для однократного использования. Они обладают наибольшей разрешающей способностью (до 100 линий на 1 мм), обеспечивают качественное изображение с передачей полутонов, но чувствительность их мала (0,1÷1 ед. ГОСТ).

Слои из селена наносят на металлические пластины напылением в вакууме, и предназначены они для получения многократных копий. Разрешающая способность при этом получается в 2÷3 раза меньше, но чувствительность слоев на основе селена можно получить до 20 ед. ГОСТ.

Рассмотрим основные стадии электрографического процесса.

Из различных способов зарядки полупроводниковых слоев применяется преимущественно зарядка в поле коронного разряда. Коронирующие электроды представляют собой или тонкие вольфрамовые провода диаметром $0,02 \div 0,1$ мм, или иглы. Важное значение имеет равномерность распределения заряда по слою. Это достигается применением ряда проводов или игл вместо одного провода, перемещением слоя относительно коронирующих проводов, использованием дополнительных экранов.

В электрофотографии используются несколько способов проявления скрытого электростатического изображения. По характеру взаимодействия частиц проявляющего вещества с заряженными участками слоя различают два основных типа проявления: сухое и жидкостное.

Имеется много разновидностей сухого метода проявления: каскадный, «магнитной кистью», меховыми валиками, аэрозольный. Метод сухого каскадного проявления наиболее распространен для селеновых фотослоев многократного использования. Каскадный проявитель обычно состоит из двух компонентов: крупнозернистого носителя и мелкодисперсного проявляющего порошка – тонера.

Вещества-носители для данного проявляющего порошка выбираются таким образом, чтобы при трении частиц носителя с частицами тонера последние приобретали заряды, противоположные по знаку зарядам электростатического изображения. Размеры частиц тонера обычно составляют $5 \div 10$ мкм, частицы носителя достигают $300 \div 700$ мкм. От размера частиц тонера зависит качество получаемого изображения. При слишком малом размере резко повышается оптическая плотность фона (вуаль) изображения. При проявлении изображения носитель обеспечивает равномерное перемещение проявляющего состава по поверхности слоя. Благодаря контактно-электрическому взаимодействию на каждой частице носителя удерживается значительное количество частиц тонера. Проявление состоит в том, что частицы тонера отрываются от носителя и осаждаются на заряженных участках слоя. В качестве носителей применяют кварцевый песок, стеклянные шарики, полистирол. Самое широкое распространение получили стеклянные шарики, покрытые пленкой смолы. Стеклянные или полистирольные шарики легко перекатываются по пластине и меньше царапают слой, чем кварцевый песок.

Каскадный способ проявления используется в большинстве отечественных и зарубежных моделей копировально-множительных аппаратов. В основном каскадный способ проявления применяют при копировании штриховых изображений. Несмотря на ряд таких достоинств, как малый расход проявляющего порошка, приемлемый уровень вуали, отсутствие пыли, каскадный метод проявления имеет серьезные недостатки, заключающиеся в том, что он не обеспечивает высокую степень проявления, плохо проявляет полутоновые изображения, т.е. дает так называемый «краевой эффект».

В методе проявления «магнитной кистью» также применяются носитель и проявляющий порошок, но частицы носителя обладают магнитными свойствами. Притягиваясь к магниту, они располагаются нитями вдоль силовых линий поля. При перемещении электрофотографического слоя относительно «магнитной кисти» происходит проявление электростатического изображения, которое по механизму не отличается от каскадного проявления.

В методе аэрозольного проявления доставка частиц к поверхности электрофотослоя осуществляется потоком воздуха. Используются высокодисперсные порошки с размером частиц $0,1 \div 1,0$ мкм, что дает возможность получать изображения с очень высоким разрешением. Аэрозольный метод позволяет получать не только штриховые, но и полутоновые отпечатки. Конструктивное оформление установки для аэрозольного проявления во многом подобно оформлению установок для напыления порошковых покрытий в электрическом поле. Сложность реализации не позволила методу найти широкое применение в серийном оборудовании.

В последнее время многие фирмы уделяют внимание электрофотографическому процессу с использованием однокомпонентного проявителя, который имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с электрофотографическим процессом, использующим двухкомпонентный проявитель. Основными из них являются: простота конструкции устройств проявления, закрепления и очистки, значительное уменьшение энергоемкости при закреплении изображения, уменьшение материалоемкости оборудования, повышение его эксплуатационных характеристик.

В отличие от традиционного двухкомпонентного проявителя однокомпонентный представляет собой однородный проявляющий порошок, каждая частица которого содержит ферромагнитную компоненту в виде ядра или отдельных вкраплений. Проявитель, имеющий магнитные свойства, используется при проявлении методом «магнитной кисти» без применения электрофотографического носителя.

Узел проявления «магнитной кистью» с однокомпонентным носителем конструктивно значительно проще (рис. 9.2) аналогичных узлов, где использован двухкомпонентный проявитель. Процесс проявления методом «магнитной кисти» происходит следующим образом.

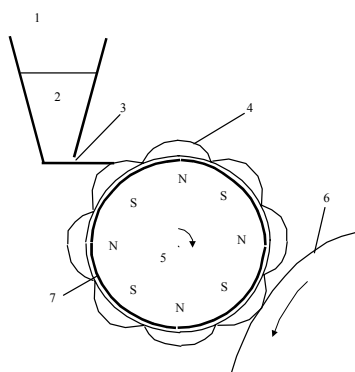


Рис. 9.2. Схема узла проявления с однокомпонентным проявителем
1 – бункер; 2 – проявитель;
3 – диафрагма; 4 – магнитная кисть;
5 – магнитный барабан;
6 – электрофотослой;
7 – проявляющий барабан.

Частицы проявителя 2 через диафрагму 3 под воздействием магнитного поля вращающегося магнитного барабана 5 попадают на поверхность немагнитного проявляющего барабана 7 и образуют магнитную кисть 4, конфигурация которой определяется конфигурацией формирующего ее магнитного поля. При использовании симметричного многополосного барабана кисть формируется в виде симметричной многолепестковой системы с числом лепестков равным числу полюсов барабана. Каждый лепесток магнитной кисти это совокупность цепочек из частичек проявителя, вытянутых в любой момент времени вдоль силовых линий магнитного поля. Длина цепочек, плотность их распределения по поверхности проявляющего барабана определяются магнитными свойствами проявителя, величинами магнитной индукции поля и его градиента.

При движении магнитной кисти по поверхности фотослоя частицы проявителя притягиваются зарядами скрытого электростатического изображения (рис. 9.3).

Существенным недостатком проявления заряженными порошками является "краевой эффект", который заключается в том, что при проявлении больших равномерно заряженных площадей получается контурное изображение. Причиной этого является то, что электрическое поле, создаваемое зарядами электростатического изображения и связанными с ними зарядами на подложке, выходит за пределы слоя только на краях изображения, где и происходит преимущественное осаждение частиц порошка. В наименьшей мере «краевой эффект» выражен при аэрозольном методе проявления. Для ослабления «краевого эффекта» применяют дополнительные электроды, расположенные в непосредственной близости над электрофотографическим слоем, и слои с регулярными неоднородностями.

Сущность переноса порошкового изображения заключается в том, что частички тонера, из которых состоит видимое изображение, могут быть после проявления перенесены электростатическим полем на бумагу. Для этого на бумагу, наложенную на фотослой, наносят заряды, совпадающие по знаку с первоначальным зарядом слоя.

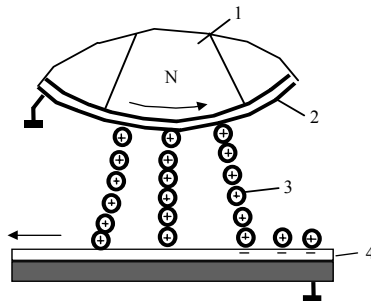


Рис. 9.3. Схема процесса проявления с проводящим однокомпонентным проявителем
1 – магнитный барабан;
2 – проявляющий барабан;
3 – частицы проявителя;
4 – электрофотослой.

Для проявления и закрепления изображения применяют и жидкие проявители. В этом случае используют трибоэлектрический эффект, наблюдаемый между порошком тонера и жидкостью с низкой электрической проводимостью, например, бензином, керосином и т.д. Чтобы частицы тонера все время находились во взвешенном состоянии в жидкости, ее постоянно перемешивают. Экспонирование электрофотографического слоя производится через слой жидкого проявителя. При этом тонер откладывается в тех местах, где имеются заряды, и сразу же закрепляется с помощью того же растворителя. Этот метод позволяет получить отпечатки с максимально возможной для электрофотографии разрешающей способностью – 200÷250 линий на 1 мм.

Качество изображения при использовании жидких проявителей значительно выше, чем при сухом проявлении. Причина этого состоит в том, что в жидком проявителе все частицы тонера обладают одинаковым зарядом в противоположность сухому проявлению. В результате при сухом проявлении частицы осаждаются и на освещенных участках слоя, образуя фон изображения.

9.3. Электрокапеструйная печать

В электрокапеструйных устройствах используется принцип электростатического управления струей монодисперсных заряженных капель по аналогии с электронно-лучевым осциллографом или дисплеем.

Эмиттер капель генерирует однородную прямолинейную капельную струю, которая получает индукционную или ионную зарядку капель в зарядном устройстве. Блок управления отклоняет струю по одной или двум координатам, прерывает и очищает ее от сателлитов (капель меньшего размера). Для обеспечения качественного процесса печати эмиссия капель, их зарядка и управление должны быть синхронными. Эту функцию выполняет синхронизирующее устройство. Механизм привода осуществляет взаимное перемещение печатающей головки и подложки.

Электрокапеструйные устройства обладают рядом достоинств: простота конструкции за счет одностадийности печати, высокая надежность благодаря отсутствию в печатающей головке механических подвижных элементов, большая скорость печати. Скорость печати при последовательном формировании знаков в виде матрицы точек 5×7 превышает 1000 знаков в секунду.

Способ эмиссии капель импульсным давлением заключается в выбросе из сопла одной капли чернил на каждое импульсное изменение давления внутри камеры с чернилами. Каплеобразование происходит в том случае, если давление в импульсе достаточно для преодоления сил поверхностного натяжения в капиллярном сопле и приобретения каплей кинетической энергии для отрыва ее от сопла.

В способе эмиссии капель высоким давлением из сопла с большой скоростью (20 м/с) выбрасывается струя проводящих чернил, которая на некотором расстоянии от сопла дробится на капли. Пьезоэлектрический преобразователь модулирует скорость истечения струи и тем самым синхронизирует дробление струи на капли. Этот способ позволяет получить наибольшую скорость электрокапеструйной печати.

Наконец, третий способ – эмиссия капель электрическим полем – реализуется по аналогии с электростатическим распылением жидкости при электроокраске, но с тем отличием, что в качестве электрода используется капилляр. Привлекательным в этом способе является простота конструкции печатающей головки, так как в ней отсутствует сочетание высокого давления с высокочастотной вибрацией. Основной проблемой является обеспечение стабильного размера и заряда капель при распылении.

В качестве примера на рис. 9.4 представлена схема электрокапеструйного маркировочного модуля с эмиссией капель высоким постоянным давлением и ультразвуковой синхронизацией.

Модуль состоит из генератора капель, включающего форсунку 3, сменного соплового элемента 4, пакета пьезокерамических дисков 11 и генератора синхронизации 9, зарядного устройства, включающего генератор импульсов напряжения 10, питающий индукционный электрод 5, системы отклоняющих электродов 6, содержащих постоянное во времени электростатическое поле, пневмогидробак для приема краски из ловушки 1, бак для подачи краски 2.

Под действием постоянного давления p величиной 100 кПа происходит вытеснение краски из бака 2 через форсунку 3 и сопловой элемент 4, представляющий собой наконечник медицинской иглы, в который запрессован часовой камень с калиброванным отверстием. Если на форсунку не оказывать возмущающего воздействия, то поток краски представляет собой сплошную ламинарную струю. При подаче на пьезо-керамические диски напряжения синхронизации пьезо-керамика начинает испытывать осевые колебания и жидкость на выходе из сопла вытекает с пульсирующей скоростью. Появляющиеся перетяжки в струе приводят к дроблению ее на капли одинакового размера. Образование капель происходит с частотой синхронизации, определяемой напряжением U_c . Если капли при проходе через зарядное устройство не заряжаются (напряжение на электроде 5 отсутствует), то капли улавливаются ловушкой 7. Капли, получившие заряд при отрыве от струи по индукционному механизму, отклоняются в поле электродов 6 и образуют отпечаток на подложке 8. Величина заряда капли определяет положение отпечатка по одной координате. Положение отпечатка по второй координате изменяется за счет механического перемещения подложки.

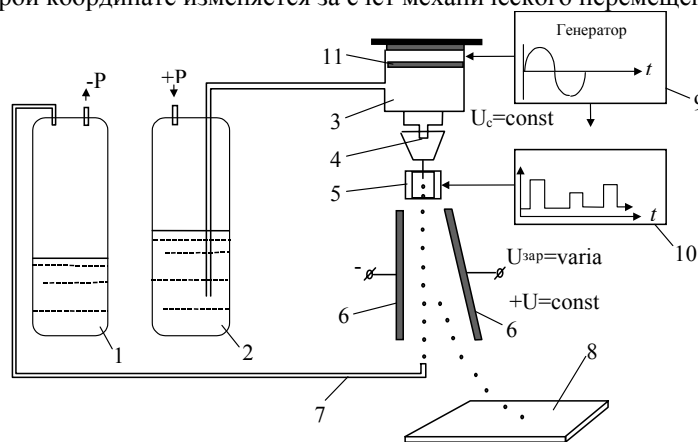


Рис. 9.4. Схема электрокапеструйного маркировочного модуля

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1 – бак приема краски; | 8 – подложка, на которую |
| 2 – бак для подачи | наносится краска; |
| краски; | 9 – генератор |
| 3 – форсунка; | синхронизации; |

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 4 – сопловой элемент; | 10 – генератор импульсов |
| 5 – зарядное устройство; | напряжения; |
| 6 – электроды, создающие отклоняющее поле; | 11 – пакет пьезокерамических дисков. |
| 7 – ловушка для незаряженных капель; | |

14. Аэрозольные электрогазодинамические устройства

14.1 Общая характеристика

В аэрозольных электрогазодинамических устройствах имеет место одновременное движение заряженных жидких или твердых частиц малого размера в электрическом поле и под действием потока газа или воздуха. Отличительной чертой этих устройств является то, что роль газового потока не сводится только к пассивному переносу частиц. Более того, взаимодействия заряженных движущихся в электрическом поле частиц с потоком приводит к существенному изменению газодинамических характеристик самих потоков: скорости, давления, температуры. Это связано с отбором или вводом дополнительной энергии в поток.

Основным элементом электрогазодинамического устройства является профилированный газодинамический канал с диэлектрическими стенками (рис. 14.1). Профиль канала рассчитывается таким образом, чтобы получить наиболее благоприятное для работы устройства распределение скорости и давления в потоке по длине. Например, в наиболее узкой части канала получается наибольшая скорость. Для того, чтобы обеспечить при возрастании скорости переход через звуковой барьер, используется сопло специальной формы – сопло Лавала – состоящее из сочетания сходящихся – расходящихся конических частей.

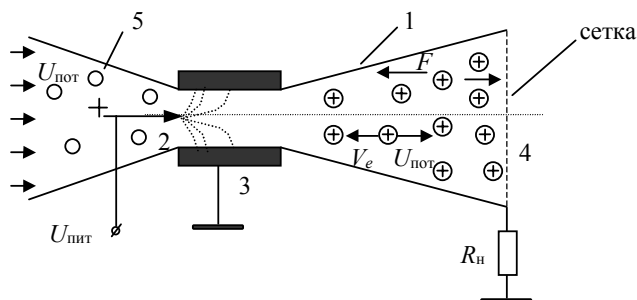


Рис. 14.1 . Общая схема электрогазодинамического устройства
1 – профилированное сопло; 2,3,4 – электроды;
5 – частицы аэрозоля.

Вторым важным элементом устройства является ряд электродов, кольцевых или в виде игл и сеток, которые соединены с источником высокого напряжения или подключены к нагрузке (рис. 14.1, электроды 2, 3, 4). В зависимости от назначения количество электродов, их расположение и форма могут быть самыми различными. Под действием напряжения, приложенного к электродам или зарядов, накопленных на них, в устройстве создаются электрические поля, совпадающие или противоположные по направлению газовому потоку.

Поток газа содержит частицы определенного размера и концентрации. Эти частицы вводятся в поток специальным устройством – распылителем порошкового материала или жидкости. Второй вариант, когда в электрогазодинамических устройствах конденсационного типа частицы получаются в результате процессов конденсации пересыщенного пара, если, например, используется влажный воздух или водяной пар.

Аналогичные условия имеют место в отношении зарядки частиц. Заряд частицам сообщается либо предварительно за пределами устройства или они заряжаются тем или иным способом внутри сопла.

В рассматриваемых устройствах целесообразно использовать частицы размером $0,3\div 0,7$ мкм, так как частицы подобного размера обладают минимальной подвижностью в электрическом поле (см. гл. 5). Минимальная подвижность частиц является условием для наиболее интенсивного обмена энергией между частицами и потоком.

Действительно, при использовании в качестве заряженных частиц ионов, подвижность которых в электрическом поле на несколько порядков выше, приводит к проскальзыванию и неполному увлечению их потоком и, как результат, недостаточно эффективному обмену энергией между частицами и потоком.

На основе процессов конденсации с последующим укрупнению частиц в условиях пересыщения могут быть получены частицы размером, примерно соответствующим минимуму подвижности.

Характерными представителями рассматриваемых устройств являются конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля, ЭГД-генераторы (источники электроэнергии), ЭГД-компрессоры (для перекачки газа или жидкости).

14.2. Конденсационные ЭГД-генераторы заряженного аэрозоля

Работу устройства поясним, используя рис. 14.1. В качестве рабочей среды применяется водяной пар, который поступает в сходящееся коническое сопло слева. При движении в сходящемся коническом сопле скорость его движения возрастает, а давление и температура падают. Режим подбирается таким, чтобы перед входом в цилиндрическую часть сопла пар переходил в насыщенное состояние, и в результате конденсации образовывались капли воды.

Зарядка обеспечивается за счет коронного разряда между иглой 2 и кольцевым электродом 3 (рис. 14.1) при подаче постоянного напряжения на иглу. Положительные ионы во внешней области коронного разряда осаждаются на каплях и на выходе цилиндрической части устройства формируется поток заряженного аэрозоля.

Правая часть сопловой системы профилируется таким образом, чтобы избежать накопления объемного заряда на выходе (скорость потока должна быть больше $15 \div 20$ м/с) и обеспечить отсутствия разрядов между струей заряженного аэрозоля и заземленными частями оборудования вблизи выхода генератора.

Основной характеристикой генераторов заряженного аэрозоля является ток выноса, который измеряется в цепи сетчатого коллектора, размещенного на выходе генератора (рис. 14.1, электрод 4). Современные генераторы обеспечивают ток выноса до 200 мкА.

14.3. ЭГД-генераторы

Схема простейшего варианта ЭГД-генератора представлена на рис. 14.2. Это устройство служит для преобразования энергии газового потока в электрическую энергию. Работает устройство следующим образом.

Высокоскоростной газовый поток ($V_{\text{пот}} \geq 50$ м/с) содержащий мелко дисперсные частицы ($2a \approx 0,1 \div 0,7$ мкм) поступает в зарядное устройство, образованное коронирующим (сетка с иглами) и заземленным (сетка) электродами. Частица заряжается во внешней зоне коронного разряда. Если на электрод 3 (рис. 14.2) подано постоянное напряжение положительной полярности, то частицы приобретают положительный заряд.

Далее заряженные частицы с потоком поступают в рабочий промежуток между электродами 4 и 5. Коллектор 5 состоит из параллельных рядов металлической сетки для того, чтобы заряженные частицы, сталкиваясь с поверхностью коллектора, отдавали ему свой заряд.

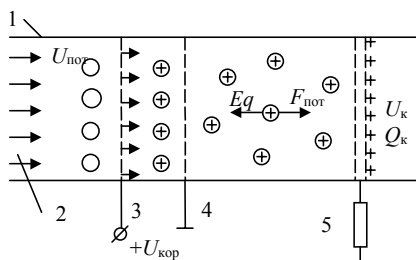


Рис. 14.2. Схема ЭГД-генератора
1 — канал с диэлектрическими стенками;
2 — газовый поток;
3 — коронирующий электрод зарядного устройства;
4 — заземленный электрод-сетка;
5 — коллектор; R_n — нагрузка.

Таким образом на коллекторе накапливается заряд Q_k и он приобретает потенциал U_k относительно заземленных электродов. Если R_n представляет собой сопротивление нагрузки, то под действием напряжения U_k через него будет протекать ток.

В рабочем промежутке на частицы действует электрическая сила $F_q = E \cdot q$, обусловленная напряжением на коллекторе, и противоположно действующая гидродинамическая сила, увлекающая частицы с потоком. Накопление заряда на коллекторе и, следовательно, увеличение напряжения $U_{\text{кол}}$ будет происходить до тех пор, пока газодинамическая сила будет превосходить тормозящую электрическую силу. Другой возможный предельный случай определяется пробоем из-за увеличения напряженности в рабочем промежутке.

В качестве характерных параметров ЭГД-генераторов можно указать напряжение на коллекторе ≈ 100 кВ и ток в цепи

нагрузки ≈ 100 мкА при напряжении на зарядном устройстве ≈ 10 кВ и примерно том же значении тока. Таким образом, выигрыш в получаемой мощности соответствует соотношению между напряжением на коллекторе и напряжением на зарядном устройстве.

14.4. ЭГД-компрессор

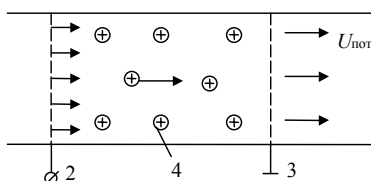


Рис. 14.3. Схема ЭГД-компрессора
1 — канал с диэлектрическими стенками;
2 — стенка с иглами;
3 — заземленный электрод-сетка;
4 — ионы или заряженные частицы.

Принцип работы ЭГД-компрессора иллюстрирует рис. 14.3. Это устройство используется для создания перепада давления в газе и организации соответствующего движения газовой среды. В этом случае электрическая энергия преобразуется в энергию газового потока.

Электрическое поле в рабочем промежутке устройства создается за счет приложенного напряжения между коронирующим и заземленным электродами. В качестве коронирующего электрода можно использовать сетку с иглами, а заземленный электрод

может быть выполнен в виде кольца или сетки. При положительной полярности напряжения на коронирующем электроде в рабочем промежутке под действие поля движутся положительные ионы в направлении слева направо. Сила, действующая на единицу объема рабочего промежутка, равна

$$F=E \cdot \rho,$$

где ρ — плотность объемного заряда.

Если ввести в газ частицы аэрозоля, то величина ρ представляет собой плотность объемного заряда частиц.

Как при использовании аэрозоля, так и в случае движения ионов, сила, действующая на объемный заряд, практически означает силу, действующую на газовую среду, так как кинетическая энергия движущихся ионов или аэрозольных частиц мала.

Как уже указывалось, появление силы, действующей на газовую среду, вызывает ее движение. Такое явление под названием «электрический ветер» известно уже давно и используется в электростатических вентиляторах. Хотя коэффициент полезного действия этих устройств невелик, простота конструкции и отсутствие движущихся частей делают их привлекательными для использования в быту.

В общем случае применение ЭГД-компрессоров может быть привлекательным для холодильников различного назначения. Однако предстоит еще большая работа по оптимизации этих устройств, повышению предельных параметров (в особенности по величине достигаемого перепада давления), надежности и экономичности.

11. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

11.1. Требования к содержанию воды и солей в нефтепродуктах

Качество добываемой нефти и качество нефтепродуктов наряду с другими показателями определяется содержанием в них влаги. Содержание влаги в исходном продукте колеблется в широких пределах – от 60% до 0,1%. Влага может находиться в нефтепродуктах в виде капелек воды, находящихся во взвешенном состоянии и образующих эмульсии, или в растворенном виде.

Кроме того, качество сырой нефти определяется содержанием солей, которое может достигать нескольких граммов на литр.

Наличие в нефти воды и солей вызывает целый ряд трудностей в процессе транспортировки и переработки:

1. удовлетворение требований качества поставляемой сырой нефти и нефтепродуктов;
2. повышенная коррозия трубопроводов и элементов технологического оборудования;
3. дополнительные энергозатраты на перекачку и ректификацию;
4. загрязнение элементов технологического оборудования.

На практике необходимость обезвоживания и обессоливания возникает трижды в цепи добыча – транспортировка – переработка.

Требования ГОСТ к качеству нефти и нефтепродукта перед транспортировкой таковы:

- содержание влаги $W_{\text{воды}} < 0,5\%$;
- содержание солей $P_{\text{соли}} < 200$ мг/л.

Перед ректификационной колонной должны удовлетворяться требования:

- $W_{\text{воды}} < 0,05\%$;
- $P_{\text{соли}} < 20$ мг/л.

К конечному продукту предъявляются более суровые требования, поэтому часто приходится использовать даже дополнительную перегонку.

Помимо первичной воды, присутствующей в сырой нефти, часто приходится дополнительно добавлять некоторое количество чистой воды для растворения присутствующих в нефти солей, и тогда система обезвоживания становится двух-, трехступенчатой.

11.2. Теоретические основы обезвоживания нефтепродуктов

Электронно-ионные технологии применяются при обезвоживании сырой нефти и нефтепродуктов. Вода в нефть попадает при добыче нефти из нефтяных скважин, а также в ходе технологических процессов переработки нефти в нефтепродукты. Для обеспечения высокого качества нефтепродуктов необходимо в ходе технологического процесса обезвоживания вывести в максимально доступном количестве соли и воду из нефтепродукта.

Удаление воды из нефтепродукта может происходить в результате организации направленного движения капель воды из объема нефтепродукта.

Первым направлением является использование седиментации капель воды. Иными словами, в процессе отстоя капли воды под действием силы тяжести осаждаются на дно резервуара.

Второе направление – зарядка и организация движения частиц воды в электрическом поле таким образом, чтобы капли воды ушли за пределы объема нефтепродукта.

Капельки воды могут под действием сил электрического поля собираться на электродах или специальных пористых перегородках и стекать на дно сосудов. Удаление воды со дна резервуара производится путем слива.

Удаление воды из нефти основано на том, что вода имеет большую плотность, чем нефть, и в процессе отстоя капли воды падают на дно резервуара. Нефть всплывает и остается в верхней части резервуара. Эффективность процесса удаления воды из объема нефтепродукта зависит от вязкости нефтепродукта. Вязкость определяется температурой, и, чем выше температура, тем меньше вязкость и больше скорость седиментации. Также скорость процесса зависит в значительной мере от размера капель воды: чем больше радиус капли, тем выше скорость оседания капель.

11.2.1. Седиментация капель воды в нефтепродукте

Установившаяся скорость оседания капель воды в нефтепродукте определяется из условия равенства внешней силы F , действующей на каплю, силе сопротивления среды движению капли. Внешняя сила, действующая на каплю, находящуюся в нефтепродукте, равна разности между силой тяжести и архимедовой силой (силой плавучести)

$$F_{\text{вн}} = \frac{3}{4} \pi a^3 g \Delta \rho, \quad (11.1)$$

где a – радиус капли, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, $\Delta \rho$ – разность значений плотности воды и нефтепродукта ($\Delta \rho = \rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}$).

В силу большой вязкости нефтепродукта и малых размеров капель воды их осаждение происходит в пределах стоксовского диапазона числа Рейнольдса ($Re \leq 0,5$) и сила сопротивления среды определяется по формуле Стокса

$$F_{\text{с}} = 6\pi\mu_{\text{эф}} a V_{\text{с}}, \quad (11.2)$$

где $V_{\text{с}}$ – скорость седиментации (осаждения); $\mu_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость среды.

Эффективная вязкость в формуле (11.2) отличается от вязкости среды (нефтепродукта) из-за того, что движение капли относительно нефтепродукта вызывает циркуляцию воды в капле и это приводит к некоторому уменьшению сопротивления среды по сравнению с движением твердой сферической частицы. Тогда

$$\mu_{\text{эkv}} = \mu \frac{2\mu + 3\mu_{\text{в}}}{3(\mu + \mu_{\text{в}})}, \quad (11.3)$$

где $\mu = (1 \div 10) \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ – вязкость нефтепродукта в зависимости от его сорта; $\mu_{\text{в}} = 10^{-3} \text{ Па}$ – вязкость воды.

Приравняв (11.1) и (11.2), получим выражение для скорости седиментации

$$V_{\text{с}} = \frac{2ga^2\Delta\rho}{9\mu_{\text{эф}}}. \quad (11.3)$$

При $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{нефти}} = 850 \text{ кг/м}^3$ получим скорость седиментации равной $V_{\text{с}} = 5 \cdot 10^{-4} a^2$. Таким образом, скорость осаждения капель в нефтепродуктах растет пропорционально квадрату радиуса капель.

11.2.2. Движение заряженных капель в электрическом поле в нефтепродукте

Скорость движения капель в электрическом поле в нефтепродукте определяется из равенства силы, действующей в электрическом поле на каплю, и силы сопротивления среды движению капли.

Допустим, что в нефтепродукте присутствуют ионы одного знака. Тогда в электрическом поле капля приобретает, как было показано в гл. 5, наибольший возможный заряд равный

$$q_k = 12\pi\epsilon_0 a^2 E. \quad (11.4)$$

Соответственно, сила, действующая на каплю в электрическом поле, будет равна

$$F_э = q_k E = 12\pi\epsilon_0 a^2 E^2. \quad (11.5)$$

Приравнявая (11.5) силе сопротивления среды по (11.2) получим формулу для скорости движения капель в электрическом поле:

$$V_E = \frac{2\epsilon_0 a E^2}{\mu_{эф}}. \quad (11.6)$$

Сопоставим скорость движения капель под действием электрического поля и в результате седиментации. Отношение значений скорости по (11.6) и (11.3) записывается в виде:

$$\frac{V_E}{V_c} = \frac{g\epsilon_0 E^2}{ga\Delta\rho}. \quad (11.7)$$

В табл. 11.1 представлены значения скорости седиментации V_c , времени осаждения капель на расстояние 1 м $t_{отс}$ ($L=1$ м) в часах и отношения V_E/V_c по (11.7) для следующих условий $E=3$ кВ/см, $\Delta\rho=150$ кг/м³ в зависимости от размера капель.

Таблица 11.1

a , (мкм)	5	10	100	500	1000
V_c , (м/с)	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
$t_{отс}$ ($L=1$ м), (час)	220	55	0,55	0,022	$5,5 \cdot 10^{-3}$
V_E/V_c	1100	550	55	11	5,5

Из табл. 11.1 следует, что время отстоя для частиц радиусом менее 100 мкм существенно превышает 1 час, которое представляется предельно целесообразным. Для частиц менее 100 мкм движение в электрическом поле может рассматриваться как более предпочтительный механизм удаления капель влаги из объема нефтепродукта. Даже для крупных капель движение в электрическом поле остается достаточно эффективным.

11.2.3. Процессы укрупнения капель воды

Процессы укрупнения капель воды в нефтепродукте играют очень важную роль, так как приводят к существенному возрастанию скорости седиментации. Процесс слияния капель воды, или коалесценция, может происходить в результате соударения частиц разного размера при седиментации, при взаимодействии поляризованных частиц в электрическом поле или при соударении частиц, участвующих в турбулизированном движении среды.

Число соударений при седиментации растет при увеличении относительной скорости сближения частиц. Как следует из (11.3)

$$V_{отн} = a_1^2 - a_2^2,$$

где a_1 и a_2 – соответственно радиусы взаимодействующих частиц.

Таким образом ясно, что эффективность коалесценции растет с увеличением радиуса частиц при одновременном увеличении различия в их размере.

На процесс слияния капель воды при столкновении оказывает влияние слой нефтепродукта, который препятствует этому слиянию.

Разрушение тонкого слоя нефтепродукта на поверхности капли обеспечивается воздействием химическими веществами – деэмульгаторами. Действие деэмульгатора приводит к снижению сил поверхностного натяжения и, таким образом, облегчает их слияние.

Основным недостатком процесса удаления влаги за счет седиментации являются:

1. Большая длительность процесса седиментации.
2. Необходимость содержания больших объемов нефти в специальных отстойниках.

Пленка на поверхности капель активно разрушается при взаимодействии капель в электрическом поле. Процесс слияния капель происходит следующим образом.

Капли, попадая в электрическое поле, поляризуются, и их форма приближается к эллипсоидальной (рис. 11.1). Соударение и слияние капель происходит за счет кулоновского взаимодействия противоположных по знаку поляризационных зарядов частиц, оказавшихся вблизи друг от друга. Из электростатики известно, что заряд поляризации $q_n \equiv \epsilon a^2$. Следовательно, сила взаимодействия, определяющая сближение и слияние капель $F_{вз} = q_n E \equiv a^2 E^2$.

Таким образом, эффективность коалесценции капель в электрическом поле существенно растет с увеличением размера частиц и напряженности поля.

Однако деформация капель в электрическом поле может привести к процессу обратному по отношению к коалесценции – разрыву капель. Это происходит, когда действие поля на поляризационные заряды превышает действие сил поверхностного натяжения, препятствующих

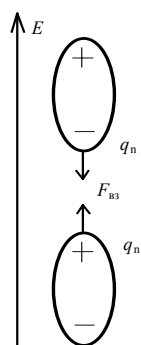


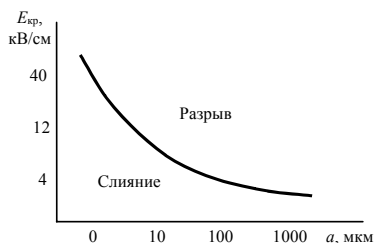
Рис. 11.1.
Поляризация
взаимодействующих
капель в
электрическом
поле

разрыву капель.

Таким образом, если $F_{\text{разр}} \equiv a^2 E^2$ и $F_{\text{пов}} \equiv \sigma a$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела сред вода–нефть ($\sigma \approx 20 \cdot 10^{-3}$ Н/м), то из условия $F_{\text{разр}} = F_{\text{пов}}$ следует, что

$$E_{\text{кр}} \equiv \sqrt{\frac{\sigma}{a}} \quad \text{или} \quad a_{\text{кр}} \equiv E_{\text{кр}}^{-2}. \quad (11.8)$$

На рис. 11.2 показана зависимость критической напряженности электрического поля от размера капель. В области, находящейся ниже этой кривой, преобладает коалесценция капель воды. Область, лежащая выше кривой, соответствует разрыву капель воды под действием сил поляризации.



11.2. Зависимость критической напряженности поля от радиуса капли

11.2.4. Зарядка капель воды в нефтепродукте

Процесс удаления капель из нефтепродукта под действием электрического поля определяется величиной заряда капель. Для суждения о возможном механизме зарядки капель воды в нефтепродукте рассмотрим ионный состав нефтепродуктов.

Вода и нефтепродукты характеризуются следующими значениями диэлектрической проницаемости ε , удельной проводимости γ и коэффициента динамической вязкости μ :

1. вода	$\varepsilon \approx 80$	$\gamma \approx 10^{-2} \div 10^{-4}$ 1/Ом·м	$\mu = 10^{-3}$ кг/м·с;
2. сырая нефть	$\varepsilon \approx 4 \div 5$	$\gamma \approx 10^{-6} \div 10^{-9}$ 1/Ом·м	$\mu = (1 \div 10) 10^{-2}$ кг/м·с;
3. светлые нефтепродукты	$\varepsilon \approx 2,2$	$\gamma \approx 10^{-10} \div 10^{-12}$ 1/Ом·м	$\mu = (1 \div 10) 10^{-2}$ кг/м·с.

Под воздействием сильных электрических полей в диэлектрических жидкостях – нефти и нефтепродуктах – начинается процесс диссоциации – образования положительных и отрицательных ионов.

Электрическое поле заставляет двигаться разноименно заряженные ионы в объеме жидкости. В результате около электродов создаются области с избыточным содержанием ионов одного знака. С ростом концентрации ионов в объеме увеличивается вероятность столкновений разноименно заряженных частиц, сопровождающихся рекомбинацией. Устанавливается динамическое равновесие между образующимися и рекомбинирующими ионами.

Движение ионов в нефти, которая имеет гораздо большую вязкость, чем вода, вызывает движение жидкости и образуются в ее объеме электрогидродинамические потоки. Это происходит потому, что движение ионов в вязкой жидкости передается нейтральным частицам, а это, в свою очередь, приводит к интенсивному перемешиванию жидкости, увеличивая интенсивность взаимодействия капель.

Капли в нефтепродукте могут приобретать заряд по контактному механизму или в результате осаждения ионов в электрическом поле в объеме нефтепродукта.

Капля воды при контакте с электродами в электрическом поле приобретает заряд, совпадающий по знаку с полярностью электрода. Как только капля оторвется от электрода, заряд с нее начинает стекать благодаря проводимости нефти.

Постоянная времени стекания заряда $\tau = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\gamma}$. Для нефти наибольшая величина τ равна

$$\tau = \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-2}}{10^{-9}} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Из приведенной оценки видно, что капля воды в нефти быстро теряет свой заряд и в этом случае индукционная зарядка неэффективна.

Для светлых нефтепродуктов оценка времени релаксации дает значение $\tau = 2$ с. Здесь индукционная зарядка становится эффективной, так как капля не успевает потерять заряд.

В соответствии с теорией индукционной зарядки частиц, изложенной в § 5.2.2, сферическая частица на электроде моделируется полуэллипсоидом вращения с соотношением осей $b/a = c/a = 0,5$ (a – длина полуоси в направлении перпендикулярном электроду и b – радиус сферической частицы) и величина заряда такой модели равна

$$q = -5,82 \pi \varepsilon_0 E b^2. \quad (11.9)$$

Кроме того, известна более точная формула, относящаяся непосредственно к сфере радиуса b

$$q = -\frac{2\pi^3}{3} \varepsilon_0 E b^2. \quad (11.10)$$

Различие между значениями заряда по (11.9) и (11.10) составляет 12%.

Рассмотрим зарядку капель воды в объеме нефтепродукта в электрическом поле. В общем случае в объеме нефтепродукта находятся и положительные и отрицательные ионы. За счет их осаждения на капле воды происходит зарядка.

В соответствии с теорией ионной зарядки (§ 5.2.1) предельный заряд капли воды равен

$$q_{\text{пред}} = q_m \frac{1 - \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}{1 + \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}, \quad (11.11)$$

где $q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E$, a – радиус капли, $\gamma_{v+} = en_+ k_+ = \rho_+ k_+$, $\gamma_{v-} = en_- k_- = \rho_- k_-$ – удельные проводимости, определяемые соответственно положительными и отрицательными ионами. Результирующая проводимость $\gamma_v = \gamma_{v+} + \gamma_{v-}$.

Подвижности положительных и отрицательных ионов примерно равны, т.е. $k_+ = k_-$. Кроме того, представим плотность объемного заряда ионов в следующем виде

$$\rho_+ = \rho_{\text{ср}} \text{ и } \rho_- = \rho_{\text{ср}} + \Delta\rho,$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – часть плотности объемного заряда одинаковая для положительных и отрицательных ионов; $\Delta\rho$ – превышение плотности заряда одного из видов ионов, в данном случае, отрицательных ионов.

Тогда (11.11) перепишется в виде:

$$q = q_m \frac{1 - \sqrt{1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}}}}. \quad (11.12)$$

Если $\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}} \ll 1$, то (11.12) упрощается:

$$q = q_m \frac{\Delta\rho}{2\rho_{\text{ср}}}. \quad (11.13)$$

Учтем увеличение проводимости среды за счет диссоциации в электрическом поле, т.е.

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\gamma_v}{2k} = \frac{\gamma_{v0} k_{\text{yc}}(E)}{2k}, \quad (11.14)$$

где γ_{v0} – проводимость среды при отсутствии поля, $k_{\text{yc}}(E)$ – коэффициент увеличения проводимости за счет диссоциации.

Воспользуемся далее моделью одномерного слоя объемного заряда плотностью $\Delta\rho$ и толщиной h , чтобы записать выражение для напряженности этого слоя

$$E_{\text{сл}} = \frac{\Delta\rho \cdot h}{2\epsilon_0 \epsilon}. \quad (11.15)$$

Если напряженность поля, создаваемая избыточным зарядом, соизмерима со средним полем в установке, т.е. $E_{\text{ср}} = E_{\text{сл}}$ то из (11.14) и (11.15) получим

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon E_{\text{ср}} k}{h \gamma_{v0} k_{\text{yc}}(E)}. \quad (11.16)$$

В табл. 11.2 представлены значения заряда по отношению к максимально возможному (предельному) q/q_m в зависимости от проводимости среды при следующих условиях $h = 0,05$ м, $E_{\text{ср}} = 5 \cdot 10^5$ В/м, $k_{\text{yc}}(E) = 2,5$.

Таблица 11.2

γ_{v0} , Ом/м	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}
$\Delta\rho/\rho_{\text{ср}}$	30	3	0,3	0,03
q/q_m	0,7	0,33	0,07	0,007

Из представленных в таблице данных следует, что на каплях воды в нефти не может накапливаться сколь-нибудь значительный заряд. Объемная зарядка капель воды эффективна для светлых нефтепродуктов с высоким удельным сопротивлением. Для нефти можно рекомендовать коалесценцию в электрическом поле с участием механизма поляризации.

11.3. Конструкции промышленных технологических установок для обессоливания и обезвоживания

нефти и нефтепродуктов

Рассмотренные выше способы выведения воды из нефти и нефтепродуктов реализованы в конструкциях технологических аппаратов обессоливания и обезвоживания. Рассмотрим схему процесса обессоливания и обезвоживания сырой нефти на нефтеперегонном заводе (НПЗ), показанную на рис. 11.3.

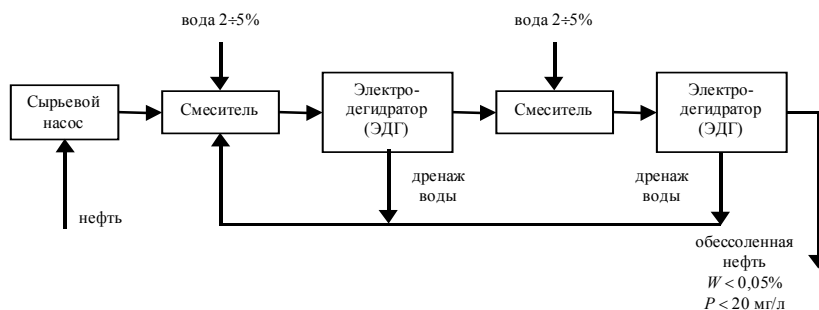


Рис. 11.3. Схема обезвоживания и обессоливания на НПЗ

Сырьевой насос подает нефть в смеситель, где происходит активное вихревое смешивание нефти с пресной водой, добавляемой в количестве 2÷5 % по отношению к нефти. Пресная вода активно растворяет соли, выводя ее из нефти. Водно-нефтяная эмульсия поступает затем в электродегидратор – аппарат по обезвоживанию нефти. В этом аппарате происходит выделение воды из смеси и получение обессоленной нефти. Затем эти операции повторяются во второй ступени технологического процесса. В итоге на выходе установки получается обессоленная нефть с содержанием воды $W < 0,05\%$ и солей $P < 20$ мг/л.

Конструкции электродегидраторов показаны на рис. 11.4. Электродегидраторы представляют из себя резервуары с размещенными внутри системами электродов. Различаются два типа конструктивных решений резервуаров, имеющих различные технологические параметры:

- | | | |
|--|-------------------------|-----------------------------|
| 1. ЭДГ шаровой конструкции | $V = 600 \text{ м}^3$, | $P = 6\div 7 \text{ атм}$; |
| 2. ЭДГ цилиндрический вертикального типа | $V = 30 \text{ м}^3$, | $P = 16 \text{ атм}$; |
| 3. ЭДГ цилиндрический горизонтального типа | $V = 160 \text{ м}^3$, | $P = 16 \text{ атм}$. |

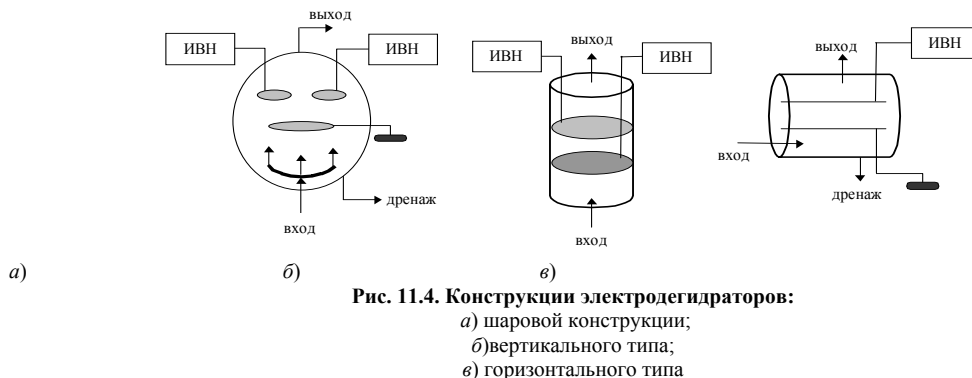


Рис. 11.4. Конструкции электродегидраторов:

- а) шаровой конструкции;
б) вертикального типа;
в) горизонтального типа

Работа электродегидраторов происходит следующим образом. Рабочая зона создается между заземленным электродом и электродом, на который подается высокое напряжение. В этой зоне капли воды приобретают заряды и, сталкиваясь между собой, сливаются и увеличиваются в размерах. Крупные капли выпадают на дно, образуя слой воды, который удаляется по отводящим трубам. Продукт для очистки – нефтяная эмульсия – подается по трубам, находящимся около дна аппарата. Таким образом, слой нефти для очистки от воды движется вверх, попадает в активную зону, очищается там от воды, и очищенная нефть скапливается в верхней части резервуара. Отсюда она удаляется для дальнейшей обработки.

На практике применяется три типа резервуаров. Шаровой резервуар имеет значительный недостаток, состоящий в том, что у него есть зоны, в которых отсутствует электрическое поле. Эти зоны снижают производительность аппарата обезвоживания нефти.

Также используются цилиндрические резервуары вертикального и горизонтального типа, в которых нет практически зон без электрического поля. Горизонтальные аппараты имеют больший объем и большую производительность, так как благодаря большему горизонтальному сечению аппарат имеет большую рабочую площадь электродов, в этом аппарате устанавливается меньшая вертикальная скорость нефти в зоне действия электрического поля.

Электродная система представляет собой набор металлических прутков диаметром 2,5 мм при расстоянии между ними 20 см. Прутки собираются в виде двух плоских рам, расположенных в двух параллельных плоскостях с

расстоянием между плоскостями 15÷20 см. Прутки в каждой раме расположены параллельно друг другу, на соседних рамах – компланарно (рис. 11.5).

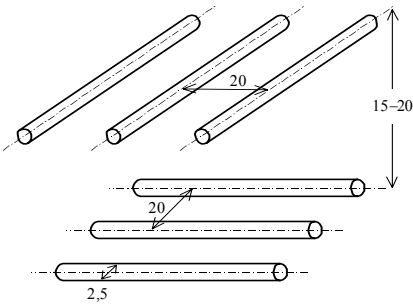


Рис. 11.5. Электродная система электродегидраторов

Предъявляемые к деэмульгаторам требования состоят в следующем:

1. Деэмульгатор не должен иметь нерабочих зон.
2. Электродные системы должны создавать электрические поля заданной величины с равномерным распределением.
3. Электродные системы и технологический режим должны быть организованы таким образом, чтобы не давать возможности капелькам воды создавать замыкающие электроды цепочки.

11.4. Технологии обезвоживания нефтепродуктов

Как было показано в предыдущих параграфах методы разделения водо–нефтяных эмульсий зависят от концентрации диспергированной в нефти воды. В зависимости от содержания воды различают: глубокое обезвоживание, сверхглубокое обезвоживание и обезвоживание высокообводненных нефтей.

11.4.1. Глубокое обезвоживание нефтепродуктов

При содержании воды $W > 0,1$ % расстояние между каплями сравнимо с их размерами ($a \approx 1 \div 100$ мкм), а при содержании воды $W < 0,05$ % расстояние между каплями больше и больше удельное сопротивление эмульсии.

Под глубоким обезвоживанием понимается изменение концентрации воды от начального значения с $W_{\text{воды}} \geq 0,1$ % до конечного с $W_{\text{воды}} \leq 0,05$ %. Это соответствует диапазону концентраций эмульгированной воды в сырой нефти. Поэтому приемлем только способ коалесценции в электрическом поле.

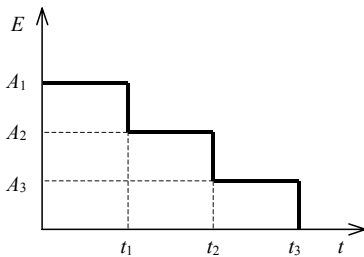


Рис. 11.6. Ступенчатое питание установки обезвоживания нефти

Как было показано ранее, чем выше напряженность электрического поля, тем эффективнее процесс коалесценции. Однако для очень крупных капель в сильных полях появляется обратный эффект, при котором капля поляризуется, растягивается вдоль линий поля и разрывается. Зависимость критической напряженности поля, при которой возможен процесс ее разрыва, от размера капли представлена на рис. 11.2. Для укрупнения капель выше критического размера при рабочей напряженности поля применяется специальное ступенчатое питание установки (рис. 11.6).

На интервале времени от 0 до t_1 происходит укрупнение капель до a_{kp1} , затем напряженность поля снижается и на интервале времени от t_1 до t_2 капля еще укрупняется до a_{kp2} и так далее, пока не будет достигнут размер капель, необходимый для быстрой седиментации.

В действительности, дополнительно к описанному механизму работает еще механизм слияния разноименно заряженных капель при их движении в промежутке (рис. 11.7).

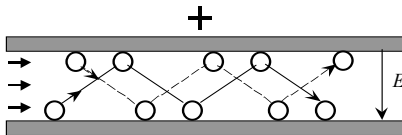


Рис. 11.7. Механизм слияния разноименно заряженных капель

Капли, достигая поверхности электрода, заряжаются по индукционному механизму и, отрываясь от поверхности электрода, двигаются вглубь промежутка. Если расстояния между электродами небольшие, то капли не успевают полностью потерять свой заряд за счет утечки. Слияние разноименно заряженных частиц происходит в случае их столкновения.

11.4.2. Сверхглубокое обезвоживание

Под сверхглубоким обезвоживанием понимается изменение концентрации воды от начального значения с $W \leq 0,05$ % до конечного с $W = 0$. Это соответствует диапазону концентраций эмульгированной воды в светлых нефтепродуктах (бензин, керосин, трансформаторное масло).

Используемая традиционно механическая очистка с помощью фильтров имеет целый ряд недостатков:

1. необходима регулярная регенерация или периодическая замена фильтров;
2. проходя через фильтр топливо дополнительно электризуется.

Принципиальная схема установки для сверхглубокого обезвоживания светлых нефтепродуктов представлена на рис. 11.8.

Рабочее пространство аппарата частично заполнено пористым диэлектриком, который имеет сильно развитую поверхность и препятствует интенсивному перемешиванию эмульсии в процессе работы. Нефтепродукт поступает в свободное пространство аппарата через тонкую входную щель, где происходит контактная зарядка капель воды. Таким образом, эмульсия поступает в камеру аппарата уже заряженной. В свободном объеме камеры происходит интенсивное перемешивание эмульсии за счет возникающих под действием электрического поля электрогидродинамических потоков. Заряженные капельки воды, двигаясь по силовым линиям поля, попадают на поверхность диэлектрика и прилипают к ней. Новые капли, пришедшие с потоком, сливаются с первыми. На поверхности диэлектрика идет процесс укрупнения прилипших капель. Как только капля вырастает до крупных размеров, она отрывается и стекает в нижнюю часть камеры.

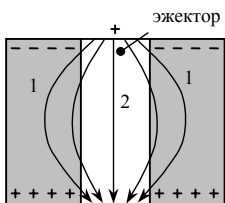


Рис. 11.8. Принципиальная схема установки для сверхглубокого обезвоживания нефтепродуктов
1 – пористый диэлектрик
2 – свободное пространство

Основными достоинствами этой технологии являются:

1. отсутствие динамического сопротивления потоку нефтепродуктов в свободном пространстве камеры;
2. простота управления технологическим процессом, так как интенсивность процесса зависит от значения приложенного напряжения и от вязкости нефтепродукта.

В настоящее время созданы установки для обезвоживания керосина при заправке самолетов с производительностью до 2 т/мин.

11.4.3. Обезвоживание высокообводненных нефтей и аномально стойких эмульсий

Есть нефти, в которых вода составляет до 60 %. Такие нефти представляют собой капли воды, покрытые нефтяной оболочкой, не дающей этим каплям сливаться.

Процесс укрупнения капли воды может быть осуществлен путем химических добавок, разрушающих нефтяную оболочку капель и позволяющих каплям сливаться.

Вторым способом, который является предпочтительнее, является организация коалесценции капель воды в электрическом поле. Необходимо обеспечить, чтобы при этом не возникало короткого замыкания между электродами, которое возможно из-за высокой проводимости нефти и наличия большого количества капель. Существует несколько способов устранения короткого замыкания:

1. на электродах создать диэлектрическое покрытие;
2. обеспечить газовый зазор у электрода;
3. создать вихревое движение жидкости, которое препятствует образованию цепочек из капель;
4. использовать определенные источники высокого напряжения, которые предотвращают возникновение коротких замыканий.

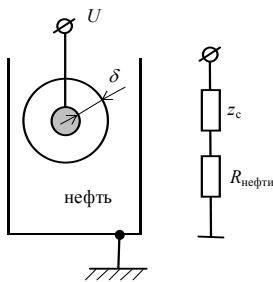


Рис. 11.9. Аппарат обезвоживания высокообводненных нефтей и эквивалентная схема

Использование диэлектрического покрытия

Этот способ реализуется путем нанесения диэлектрического покрытия на высоковольтный электрод (рис. 11.9).

При возникновении проводящих каналов в нефти напряжение прикладывается к диэлектрическому слою и короткого замыкания не происходит. В нормальном режиме напряжение распределяется между слоем и нефтью.

Эквивалентная схема представляется в виде последовательного соединения двух сопротивлений z_c и $R_{\text{нефти}}$:

$$\text{где } z_c = \frac{1}{\omega c} \equiv \frac{\delta}{f \varepsilon};$$

δ – толщина диэлектрического покрытия, f – частота питающего напряжения, ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, $R_{\text{нефти}}$ – эквивалентное сопротивление нефти.

Для того, чтобы слой нефти находился под воздействием электрического поля необходимо, чтобы на диэлектрическом покрытии не возникало большое падение напряжения. Это достигается путем увеличения частоты f питающего напряжения или путем увеличения ε .

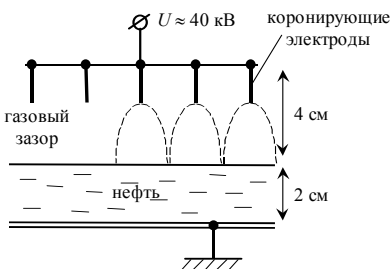


Рис. 11.10. Схема процесса с воздушным зазором между поверхностью жидкости и электродами

Высоковольтные источники высокой частоты дороги. Кроме того, с ростом частоты напряжения уменьшается интенсивность электрогидравлических потоков из-за того, что не будет создаваться избыточных электрических зарядов, которые являются источниками этих потоков. В результате интенсивность слияния капель падает.

Лучшим решением оказалось применение диэлектрического покрытия из керамики с высоким значением ε .

Применение газового зазора

Применение газового зазора иллюстрируется на рис. 11.10. При подаче высокого напряжения на коронирующие электроды в газовой среде над поверхностью нефти образуется коронный разряд. Движение носителей зарядов в нефти вызывает появление потоков в слое жидкости. В результате возникает интенсивное перемешивание и взаимодействие капель, приводящее к их слиянию.

Специальные источники высокого напряжения

По железным дорогам нефть перевозят в цистернах. После слива нефти цистерны моют водой. В результате образуется вода, загрязненная нефтью. Возникает задача отделить от нефти и использовать воду вторично, а нефть по назначению. Для решения этой задачи применяют источники импульсов высокого напряжения специальной формы (рис. 11.11).

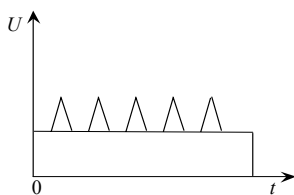


Рис. 11.11. Форма питающего напряжения

Высоковольтный источник для аппарата отделения воды от нефти вырабатывает импульсное напряжение, которое используется для разрушения нефтяных оболочек на каплях воды. Длительное постоянное напряжение обеспечивает слияние капель воды.

12. ТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМО - ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

12.1. Основы плазмы – химических преобразований

До настоящего момента мы рассматривали атомы и молекулы в воздухе, их возбуждение, диссоциацию, ионизацию и возбуждение не акцентируя внимание на химических преобразованиях, которые происходят с этими частицами. Теперь мы рассмотрим процессы химических преобразований, которые происходят с различными атомами, молекулами, активными радикалами и ионами, которые возникают в процессе формирования и развития электрического разряда в воздухе.

Все физико-химические процессы происходящие в плазме газового разряда можно разделить на три временных интервала:

1. $\Delta t \approx 10^{-15}$ с – на этом интервале времени завершаются процессы возбуждения атомов и молекул электронным или фотонным ударом;
2. $\Delta t \approx 10^{-13}$ с – на этом интервале времени завершаются процессы ионизации и диссоциации атомов и молекул;
3. этот интервал времени имеет переменную продолжительность вплоть до $\Delta t \approx 10^{-3}$ с в зависимости от состава газа, температуры и давления – это стадия химических процессов и реакций.

12.1.1 Понятие кинетики химических реакций

Химическая кинетика – это учение механизмов и закономерностей протекания во времени химических процессов. Под химической реакцией понимается процесс превращения одного или нескольких веществ (реагентов) в вещества (продукты реакции), отличающиеся от исходных по химическому или изотопному составу, по строению молекул или заряду.

В большинстве случаев химический процесс происходит не путем прямого превращения исходных веществ в продукты реакции, а состоит из нескольких стадий. Каждую из этих стадий можно рассматривать как самостоятельную химическую реакцию со своими исходными веществами и продуктами. Такие реакции называются элементарными.

Важнейшими характеристиками химической реакции являются степень превращения (т.е. отношение количества вещества, вступившего в реакцию, к его исходному количеству) и скорость реакции (т.е. количество вещества, вступающего в реакцию или образующегося в результате реакции в единицу времени в единице объема):

$$\omega = \pm \frac{dN}{dt},$$

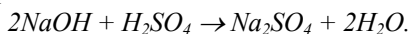
где N – число молей (или молекул) в единице объема.

Поясним сказанное на примере реакции:



где A, B, C, D – реагенты и продукты реакции, а числа a, b, c, d – стехиометрические коэффициенты, которые определяют количественные соотношения, в которых вещества вступают в реакцию.

Например:



В этой реакции: $NaOH$ и H_2SO_4 – реагенты; Na_2SO_4 и H_2O – продукты реакции. Стехиометрические коэффициенты $a = 2, b = 1, c = 1, d = 2$ показывают, что если в реакцию вступят два моля $NaOH$ и один моль H_2SO_4 , то эти вещества прореагируют полностью и образуется один моль Na_2SO_4 и два моля H_2O .

Скорость изменения плотности каждого реагента или продукта реакции в ходе такой реакции будет связана со скоростью реакции следующим соотношением:

$$\omega = -\frac{1}{a} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{dN_B}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dN_C}{dt} = \frac{1}{d} \frac{dN_D}{dt}.$$

Для элементарных химических реакций действует следующее обобщенное правило химической кинетики (закон действующих масс): скорость элементарной химической реакции в каждый момент времени пропорциональна произведению текущих концентраций реагирующих веществ, взятых в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам. Для реакции (12.1) выражение для скорости реакции будет иметь вид:

$$\omega = k \cdot (N_A)^a \cdot (N_B)^b,$$

где k – константа скорости реакции, независимая от плотности реагентов. Ее еще называют удельной скоростью реакции, поскольку при концентрации каждого из реагирующих веществ, равной единице, она равна фактически скорости реакции.

Понятие константы скорости реакции широко используется в плазмо-химических технологиях при оценке интенсивности и роли происходящих в них химических реакций.

При протекании реакции по стадиям производятся и расходуются так называемые промежуточные вещества, которые обычно представляют из себя химически активные частицы – ионы, возбужденные молекулы, свободные радикалы. Свободные радикалы – это молекулы в особом состоянии, когда происходит разрыв связи между атомами, и эти молекулы приобретают, таким образом, свободные валентные связи. В результате свободные радикалы получают некоторую избыточную потенциальную энергию по сравнению с исходными молекулами. Как следствие это приводит к увеличению химической активности. Свободные радикалы существуют очень короткое время ($\sim 10^{-3}$).

Свободные радикалы образуются, например, при взаимодействии молекул с электронами в электрическом поле:



Ионы, свободные атомы и радикалы имеют неспаренные электроны на внешней электронной оболочке и в связи с их высокой химической активностью их называют химически активными частицами. Возбужденные молекулы и атомы служат передатчиками энергии от электронов плазмы к активным (ионизируемым или диссоциируемым) атомам или молекулам.

Сложные реакции состоят из простых реакций (стадий), которые можно в свою очередь классифицировать по нескольким группам:

1. Необратимые реакции вида: $A \rightarrow B$. Химические реакции называются необратимыми, если вещества практически полностью превращаются в конечный продукт. Важнейшим условием необратимости химических реакций является выделение одного из продуктов реакции в виде осадка, образование газообразного продукта реакции либо образование малодиссоциированного продукта реакции (например, воды).

2. Двусторонние или обратимые реакции вида: $A \leftrightarrow B$. Большая часть химических реакций обратима. Обратимыми называются такие химические реакции, которые протекают при данной температуре в двух противоположных направлениях – прямом и обратном.

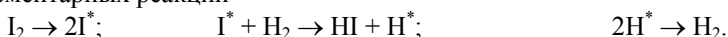
3. Параллельные реакции вида: $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$, $A \rightarrow L$;

4. Последовательные реакции вида: $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow L$.

Сам процесс или акт химического превращения заключается в том, что при сближении двух или нескольких частиц происходит постепенная перестройка связей между атомами. При этом одни связи разрываются, а другие образуются. В результате из исходных веществ образуются продукты реакции.

Состояние, в котором одни связи уже растянулись, но еще не разорвались, а новые только образуются, называется переходным состоянием. Совокупность частиц, находящихся в переходном состоянии образует, так называемый, активированный комплекс, который в переходном состоянии находится на вершине потенциального барьера.

В качестве примера рассмотрим ход реакции $H_2 + I_2 = 2HI$, которая, как показали современные исследования, является сложной реакцией, состоящей из трех элементарных реакций



Рассмотрим более подробно вторую элементарную реакцию. В процессе протекания этой реакции сначала радикал йода I^* сближается с молекулой водорода, далее связь между атомами водорода растягивается и образуется активный комплекс, состоящий из атома йода и двух атомов водорода. И, наконец, формируется связь между атомом йода и атомом водорода и образуется

несвязанный радикал водорода. Схематично путь этой реакции изображен на рис. 12.1.

Примерами быстро протекающих химических реакций могут служить реакции типа взрыва, а медленно протекающих реакций – реакции ферментации виноградного сока с получением виноградного вина, которые протекают от нескольких месяцев до нескольких лет.

На практике скорость химической реакции можно определить графически из зависимости массы продукта химической реакции в единице объема от времени протекания реакции (рис. 12.2).

12.1.2. Особенности плазмо-химических, фото-химических и радиационно-химических реакций

Скорость большинства химических реакций растет с повышением температуры. Это связано с тем, что далеко не каждое столкновение молекул реагирующих веществ приводит к химической реакции между ними. Для того чтобы образовались новые молекулы, необходимо предварительно ослабить или разорвать связи между атомами в молекулах исходных веществ. Для этого требуется затрата

определенного количества энергии. Повышение температуры означает увеличение хаотического движения молекул. Зависимость константы скорости реакции от температуры передает полуэмпирическое уравнение Аррениуса:

$$k = Ae^{-E_a/RT},$$

где A – некоторая константа, зависящая от вступающих в реакцию веществ; R – газовая постоянная; T – температура; E_a – так называемая энергия активации реакции.

Энергией активации называют избыточную энергию, которая должна быть сообщена молекулам для того чтобы их столкновение привело к образованию нового вещества (т.е. произошла химическая реакция между этими частицами). Величина энергии активации зависит от вида реагирующих частиц и от их энергетического состояния. Так, для реакций между валентно-насыщенными молекулами (входящие в молекулы атомы имеют полностью заполненную внешнюю электронную оболочку) энергия активации близка к энергии диссоциации и составляет 100–200 кДж/моль. Реакции атомов (или радикалов) с молекулами протекают с промежуточными значениями энергии активации

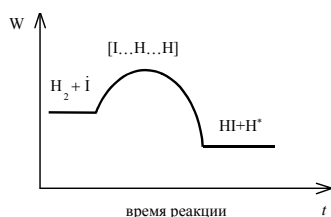


Рис. 12.1. Схематичное изображение химической реакции на шкале потенциальной энергии

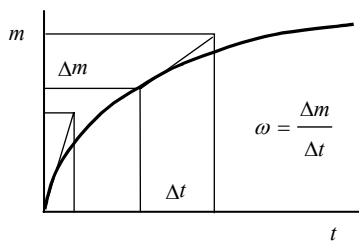


Рис. 12.2. Зависимость массы продукта реакции от времени реакции и определение скорости химической реакции

(40÷100 кДж/моль). Реакции между атомами и радикалами (или между радикалами) происходят с энергией активации близкой к нулю.

Таким образом, химические реакции идут успешно тогда, когда реагенты приобретают определенное количество энергии, и главной особенностью плазмохимических реакций является то, что в газоразрядной плазме под действием различных внешних воздействий атомы и молекулы имеют возможность перейти в активные частицы: радикалы, ионы или возбужденные частицы. Это обстоятельство позволяет преодолеть потенциальный барьер совершенно новых элементарных химических реакций, что обеспечивает образование совершенно новых химических соединений никогда не образующихся в данных условиях, либо позволяют создать перекося в скоростях обратимых химических реакций и тем самым создать условия для наработки таких продуктов реакции, которые при нормальных условиях имеют крайне низкие равновесные концентрации.

Приведем практически важные примеры использования плазмо-химических реакций. Наибольшее распространение получил электросинтез озона, т.е. преобразование молекул кислорода O_2 в молекулы озона O_3 . Плазма газового разряда используется для его получения уже около ста лет. Все это время шел непрерывный процесс поиска более рациональной формы газового разряда и условий протекания химических реакций. Поэтому эти реакции на сегодняшний день наиболее исследованы и являются основой для дальнейших разработок.

Более десяти лет ведутся исследования по применению плазмы газового разряда для очистки газовых выбросов тепловых электрических станций от оксидов азота и серы. Созданы пилотные установки, ведутся активные исследования и поиски новых технических решений.

В последние годы начаты работы по применению плазмы импульсного газового разряда для очистки газовых выбросов лакокрасочных, гальванических и пропиточных производств от паров растворителей и компаундов в замен энергоёмких технологий высокотемпературного дожигания.

12.2. Генераторы озона и озонные технологии

12.2.1. Физико-химические и биологические свойства озона

Озон – это второе относительно устойчивое соединение (аллотропное) кислорода. В отличие от молекулы кислорода, молекула озона состоит из трех атомов и имеет более длинные связи между атомами кислорода (длина связи в молекуле озона 128 Å, в то время как длина связи в молекуле кислорода 121 Å).

Физические свойства озона. Озон может существовать во всех трех агрегатных состояниях. При нормальных условиях озон – газ голубоватого цвета. Температура кипения озона равна – 112 °С, а температура плавления составляет – 192 °С.

Слово озон в переводе с греческого означает «пахнущий» и это название действительно отражает одну из особенностей озона, т.к. его характерный запах проявляется уже при концентрациях 10^{-7} ÷ 10^{-8} %.

Благодаря своей химической активности озон имеет очень низкую предельно-допустимую концентрацию в воздухе (соизмеримую с ПДК боевых отравляющих веществ) $5 \cdot 10^{-8}$ % или 0,1 мг/м³.

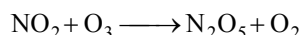
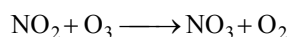
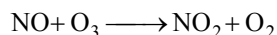
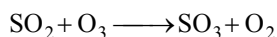
Химические свойства озона. Следует отметить прежде всего два основных свойства озона:

1. Озон в отличие от атомарного кислорода является относительно устойчивым соединением. Он самопроизвольно разлагается при высоких концентрациях, при этом чем выше концентрация, тем выше скорость реакции разложения. При концентрациях озона 12÷15 % озон может разлагаться со взрывом. Следует также отметить, что процесс разложения озона ускоряется с ростом температуры, а сама реакция разложения $2O_3 \rightarrow 3O_2 + 68$ ккал экзотермична и сопровождается выделением большого количества тепла.

2. Озон является одним из сильнейших природных окислителей. Окислительный потенциал озона составляет 2,07 В (для сравнения у фтора 2,4 В, а у хлора 1,7 В).

Озон окисляет все металлы за исключением золота и группы платины.

Озон доокисляет оксиды серы и азота:



Озон окисляет аммиак с образованием нитрита аммония:



Озон активно вступает в реакцию с ароматическими соединениями с разрушением ароматического ядра. В частности озон реагирует с фенолом с разрушением ядра.

Озон активно взаимодействует с насыщенными углеводородами с разрушением двойных углеродных связей.

Взаимодействие озона с органическими соединениями находит широкое применение в химической промышленности и в смежных отраслях. Использование реакции озона с непредельными соединениями позволяет получать искусственным путем различные жирные кислоты, аминокислоты, гормоны, витамины и полимерные материалы. Реакции озона с ароматическими углеводородами – дифениловую кислоту, фталевый диальдегид и фталевую кислоту и др.

Реакции озона с ароматическими соединениями легли в основу технологий дезодорации различных сред, помещений и сточных вод.

Биологические свойства озона. Несмотря на большое количество исследований механизм недостаточно раскрыт.

Известно, что при высоких концентрациях озона наблюдаются поражения дыхательных путей, легких и слизистой оболочки. Длительное воздействие озона приводит к развитию хронических заболеваний легких и верхних дыхательных путей.

Воздействие малыми дозами озона оказывает профилактическое и терапевтическое воздействие и начинает активно использоваться в медицине.

Озон воздействует на все микроорганизмы, разрушая мембрану и окисляя протоплазму. При этом следует отметить, что концентрации озона губительные для простых микроорганизмов на несколько порядков ниже, чем для более высокоорганизованных.

12.2.2. Основные способы получения озона

Озон образуется из кислорода. Существует несколько способов получения озона, среди которых наиболее распространенными являются: электролитический, фотохимический и электросинтез в плазме газового разряда.

Электролитический метод синтеза озона осуществляется в специальных электролитических ячейках. В качестве электролитов используются растворы различных кислот и их соли (H_2SO_4 , $HClO_4$, $NaClO_4$, $KClO_4$). Образование озона происходит за счет разложения воды и образования атомарного кислорода, который присоединяясь к молекуле кислорода образует озон и молекулу водорода. Этот метод позволяет получить концентрированный озон, однако он весьма энергоемкий, и поэтому он не нашел широкого распространения.

Фото-химический метод получения озона представляет из себя наиболее распространенный в природе способ. Образование озона происходит при диссоциации молекулы кислорода под действием коротковолнового УФ излучения. Этот метод не позволяет получать озон высокой концентрации. Приборы, основанные на этом методе, получили распространение для лабораторных целей, в медицине и пищевой промышленности.

Электросинтез озона получил наибольшее распространение. Этот метод сочетает в себе возможность получения озона высоких концентраций с большой производительностью и относительно невысокими энергос затратами.

Электросинтез озона

В результате многочисленных исследований по использованию различных видов газового разряда для электросинтеза озона распространение получили аппараты использующие три формы разряда:

1. Барьерный разряд – получивший наибольшее распространение, представляет из себя большую совокупность импульсных микрозарядов в газовом промежутке длиной 1÷3 мм между двумя электродами, разделенными одним или двумя диэлектрическими барьерами при питании электродов переменным высоким напряжением частотой от 50 Гц до нескольких килогерц;

2. Поверхностный разряд – близкий по форме к барьерному разряду, получивший распространение в последнее десятилетие благодаря своей простоте и надежности. Так же представляет из себя совокупность микрозарядов, развивающихся вдоль поверхности твердого диэлектрика при питании электродов переменным напряжением частотой от 50 Гц до 15÷40 кГц.

3. Импульсный разряд – как правило стримерный коронный разряд, возникающий в промежутке между двумя электродами при питании электродов импульсным напряжением длительностью от сотен наносекунд до единиц микросекунд.

Из большого числа различных современных конструкций озонаторов, использующих электрический разряд для получения озона, наибольшее распространение получили озонаторы с так называемым барьерным разрядом.

Производительность одной установки может составлять от граммов до 150 кг озона в час.

Барьерным разрядом называют разряд в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых (или оба) покрыт слоем твердого диэлектрика (рис. 12.3) Если к электродам приложено переменное напряжение с амплитудой, превышающей пробивное напряжение газового промежутка, то в нем возникает разряд, состоящий из большого числа отдельных искр, дискретных в пространстве и во времени. Разряд продолжается до тех пор, пока мгновенное значение напряжения на электродной системе не достигнет U_{max} . Особенностью барьерного разряда является локальное накопление заряда на поверхности диэлектрического барьера в процессе развития в промежутке каждой отдельной искры

Рассмотрим подробнее указанное явление. Пусть к промежутку с барьером приложено переменное напряжение,

при котором еще нет разряда. Это напряжение распределяется по емкостям барьера и газового промежутка, так что к газовому промежутку приложено напряжение

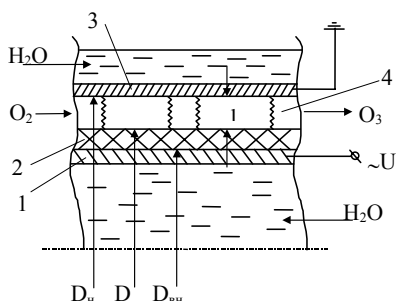


Рис. 12.3. Электродная система озонатора.

- 1, 3 – электроды;
2 – диэлектрический барьер;
4 – зона разряда.

$$U_r = U \frac{C_6}{C_r + C_6}, \quad (12.2)$$

где U – напряжение на электродах; C_6 – емкость барьера; C_r – емкость газового промежутка.

Для цилиндрической системы электродов

$$C_6 = 2\pi\epsilon_0\epsilon_6 \frac{L}{\ln \frac{D}{D_{\text{вн}}}}; \quad C_r = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{D_{\text{н}}}{D}},$$

где ϵ_6 и ϵ_r – диэлектрические проницаемости барьера и газа; L – длина электродов; $D_{\text{н}}$, D , $D_{\text{вн}}$ – диаметры электродов барьера (рис. 12.3).

Рассмотрим первый полупериод действующего напряжения, когда электрод с диэлектриком является анодом (рис. 12.4, а). Когда напряженность внешнего поля $E_{\text{вн}}$, создаваемого приложенным напряжением, достигнет значения начальной напряженности, в промежутке начинаются интенсивные ионизационные процессы и создается большое число лавин, продвигающихся по направлению к диэлектрическому барьеру.

Расчеты показывают, что при нормальной плотности газа в разрядном промежутке длиной $l = 1 - 3$ мм развитие лавин может привести к созданию объемных зарядов с плотностью N , при которой выполняется условие перехода лавины в стример (количество электронов в лавине достигает 10^8). При выполнении этого условия в каком-то месте промежутка возникает стримерный канал, головка которого доходит до поверхности электрода, покрытого диэлектрическим барьером.

Происходит пробой газового промежутка по многолавино-стримерному механизму. Внешне разряд выглядит как искра. Этому процессу соответствует напряжение $U_{\text{пр}}$.

В ходе образования и движения лавин и, в особенности, при подходе к диэлектрическому барьеру головки стримера, на поверхность барьера оседают отрицательные заряды – электроны. Диаметр канала стримера составляет при рассматриваемых условиях $\approx 0,1$ мм. Примерно таких же размеров оказывается и пятно заряда, осевшего на барьер. Что касается положительных ионов, образовавшихся при развитии лавин, то, обладая гораздо меньшей подвижностью, они постепенно смещаются в сторону металлического катода. Подходя к нему, они нейтрализуются. Накопление отрицательного заряда на поверхности диэлектрического барьера вызвано большим объемным сопротивлением материала барьера (порядка $10^{14} - 10^{16}$ Ом·см). Большое поверхностное сопротивление препятствует растеканию заряда по поверхности.

Образуется заряженный диск с максимальной плотностью заряда в центре диска. Заряженный диск создает поле, имеющее как нормальную $E_{\text{ос}}$, так и тангенциальную $E_{\text{пов}}$ составляющие. Под действием последней составляющей вдоль поверхности барьера начинается поверхностный разряд лавинного типа. В рассматриваемом нами случае отрицательно заряженного диска поверхностный разряд создает круглое пятно отрицательного заряда с диаметром, во много раз превышающим диаметр начального заряда. Одиночный разряд в промежутке может создать пятно диаметром до 15÷17 мм (рис. 12.4, а).

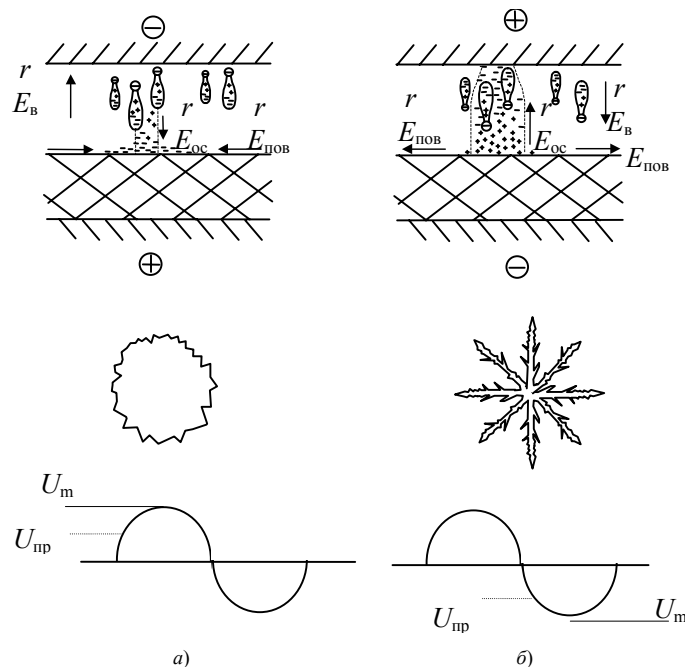


Рис. 12.4. Развитие разряда в промежутке озонатора

Образовавшееся на барьере после поверхностного разряда пятно отрицательного заряда создает в разрядном промежутке свое поле с нормальной составляющей напряженности $E_{\text{ос}}$, направленной встречно к приложенному внешнему полю. Измерения и расчеты показывают, что напряженность $E_{\text{ос}}$ может достигать нескольких кВ/см. В итоге суммарное поле в промежутке $E_{\Sigma} = E_{\text{вн}} - E_{\text{ос}}$ снижается, и ионизационные процессы в этой части промежутка

прекращаются. Разряд гаснет. Весь описанный процесс занимает время до десяти наносекунд, за которое приложенное напряжение не успевает измениться. Одновременно начинается развитие стримера в другой части промежутка, где процесс повторяется.

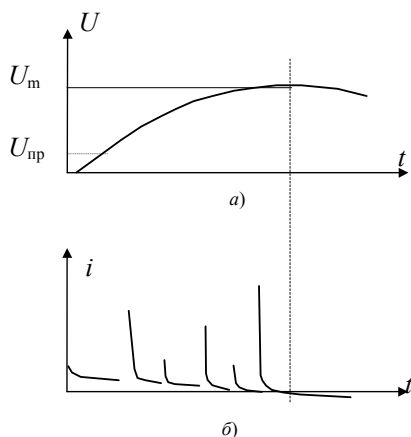


Рис. 12.5. Осциллограммы тока и напряжения

а) осциллограмма напряжения на электродах;

б) осциллограмма тока через озонатор.

Образование в разных точках искр и их затухание будет продолжаться до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет максимального значения U_m . После этого разряд в промежутке прекращается. Осциллограмма тока через промежуток выглядит так, как показано на рис. 12.5, где на кривую тока смещения $i_{см}$ наложены импульсы тока отдельных искр.

Рассмотрим теперь полупериод, когда электрод с диэлектрическим барьером является катодом. При этом вновь рассматривается самый первый полупериод, при котором развитие разряда в промежутке начинается при отсутствии заряда на диэлектрике.

Развитие разряда идет в этом случае в направлении металлического электрода. Вновь образуется стример, но при подходе его головки к аноду все электроны уходят в металл. Накопления заряда на аноде не происходит. Но развитие стримера идет и в сторону катода, к которому перемещаются положительно заряженные ионы. Подходя к барьеру, они оседают на нем, образуя положительный заряд, являющийся причиной возникновения поверхностного разряда. В данном случае поверхностный разряд носит стримерный характер и на поверхности барьера остается пятно в виде звездочки (рис. 12.4,б), максимальная напряженность поля $E_{ос}$, также составляет несколько кВ/см. В результате суммарная напряженность поля в промежутке снижается и разрядные процессы в этой части промежутка прекращаются. Диаметр звездочек

одиночных разрядов достигает 20÷25 мм. Когда напряжение на промежутке достигает U_m , разряд прекращается.

Иначе обстоит дело, когда разряд развивается в промежутке, в котором на диэлектрическом барьере уже имеется заряд, оставшийся от предыдущего полупериода. Поскольку поверхностное сопротивление материала барьера очень велико, заряд не успевает релаксировать за время одного периода. Распределение зарядов на поверхности к началу разряда в данный полупериод остается практически тем же, как в момент окончания разряда в предыдущий полупериод. Это означает, что в новый полупериод поле осевших зарядов складывается с внешним полем, усиливая его. Поэтому в местах, где расположены пятна или звездочки осевших зарядов, напряженность поля достигает начальной E_n раньше, чем в остальной части промежутка. Развитие ионизационных процессов и разряд оказываются «привязанными» к местам разряда в предыдущий полупериод.

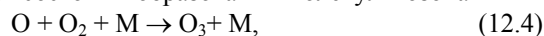
Картина разряда в промежутке становится еще более сложной после длительного воздействия переменного напряжения. Но есть определенные закономерности, проявляющиеся во всех случаях: в каждый полупериод разряд имеет вид отдельных, быстро затухающих искр. Разряд начинается, когда напряжение, приложенное к электродной системе, меньше разрядного напряжения газового промежутка. В каждый полупериод образуются импульсы тока, число и амплитуда которых являются статистическими величинами.

В процессе развития каждой отдельной искры происходят электрохимические реакции, результатом которых является образование озона и его разложение. Процесс образования озона состоит из нескольких этапов, хотя в общем случае число реакций, связанных с образованием озона и его разложением, превышает 70, существуют основные, без прохождения которых получение озона невозможно. Основной реакцией является процесс диссоциации молекул кислорода при взаимодействии со свободным электроном;



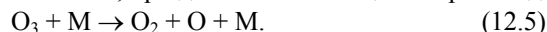
постоянная времени этого процесса очень мала и составляет единицы наносекунд.

Следующий этап состоит в образовании молекулы озона



в которой принимает участие третья частица М: молекула, ион, электрон или атом в нейтральном или возбужденном состоянии. Исследования показывают, что образование озона требует времени до 10 мкс.

Кроме образования озона, при движении частиц газа происходит разложения молекул O_3 по реакции



Эта реакция идет тем интенсивнее, чем выше температура газа.

Образующийся в зоне разряда озон диффундирует в соседние области. В результате прохождения рабочего газа через разрядную зону озонатора на выходе получается озono-воздушная или озono-кислородная смесь с концентрацией озона $(10^{-1} \div 10)$ г/м³, при этом получаемое количество озона зависит от превышения интенсивности образования над интенсивностью разложения.

Рассмотренный механизм развития разряда в однородном поле промежутка с диэлектрическим барьером на электроде позволяет установить те особенности, из-за которых барьерный разряд стал одним из основных источников озона. Главная особенность – дискретность разрядных процессов в пространстве и во времени. В течение части каждого полупериода действующего напряжения разряд распределен по всему промежутку. Это позволяет интенсивно охлаждать всю разрядную зону охлаждением электродов, что особенно важно для предотвращения термического разложения уже образовавшегося озона. Барьерный разряд, кроме того, является наиболее рациональной формой разряда и для образования озона. Барьер выступает в роли токоограничивающего сопротивления для каждой отдельной искры, что предотвращает большие токи, т.е. потери энергии на разогрев разрядного канала. Вместе с тем, в таком разряде

процессы диссоциации молекул кислорода идут с наибольшей интенсивностью, что обеспечивается имеющим место распределением по энергиям свободных электронов.

Образование искры в каждой области промежутка, где напряженность поля превысит пробивную и затухание этой искры из-за спада напряженности поля, вызванного осевшими зарядами, поддерживает на электродах практически неизменное напряжение на газовом промежутке U_r в течение всего времени горения разряда в данный полупериод. Поэтому средняя напряженность поля в газовом промежутке в течение всего времени горения разряда лишь незначительно отличается от начальной. Постоянство напряженности обеспечивает при разряде стабильное распределение электронов по энергиям, что важно для прохождения электрохимических реакций образования озона.

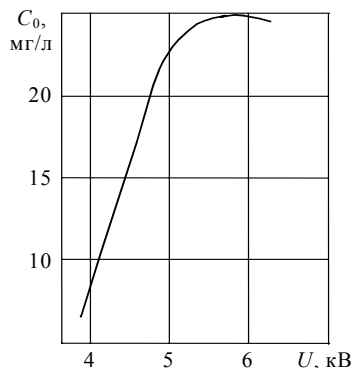


Рис. 12.6. Выход озона в зависимости от напряжения
частота $f = 1500$ Гц;
расход газа $v_r = 1$ л/мин

С ростом приложенного напряжения время горения разряда в каждый полупериод увеличивается, увеличивается число искр и возрастает выход озона. Однако почти пропорциональный рост выхода озона с ростом напряжения продолжается до определенного предела (рис. 12.6). С ростом числа искр увеличивается температура разрядной зоны, усиливается разложение озона. Работа озонатора при перегреве становится неэффективной. Поэтому рабочий режим озонатора должен лежать в области линейной части кривой зависимости концентрации озона C_{O_3} от напряжения.

Приведенное выше описание процессов в озонаторе отражает только физическую картину в газовом промежутке. Для электрической цепи, включающей источник питания и озонатор, последний представляет сложную нагрузку, изменяющуюся при каждом зажигании разряда. Анализ процессов в эквивалентной электрической цепи содержащей озонатор, позволяет связать физические процессы с электрическими величинами, определяющими эти процессы.

В эквивалентной электрической схеме озонатор может быть представлен двумя последовательно включенными емкостями: емкостью газового промежутка и емкостью барьера, как это было определено ранее.

Пусть к озонатору приложено переменное напряжение

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad (12.6)$$

До начала разряда в газовом промежутке, т.е. при напряжении $U_r < U_{пр}$, приложенное напряжение распределяется по емкостям газового промежутка и барьера: $U = U_r + U_6$, причем

$$U_6 = U \frac{C_r}{C_r + C_6}; \quad U_r = U \frac{C_6}{C_r + C_6}. \quad (12.7)$$

Ток через озонатор равен:

$$i = U_0 \omega \frac{C_6 C_r}{C_6 + C_r} \cos \omega t, \quad (12.8)$$

Когда напряжение на газовом промежутке станет достаточным для его пробоя, в промежутке начинается разряд, напряжение на газовом промежутке становится равным напряжению горения разряда $U_{гор}$ и не меняется пока горит разряд. Тогда напряжение на диэлектрическом барьере может быть определено как

$$U_6 = U_0 \sin \omega t - U_{гор}. \quad (12.9)$$

Ток через озонатор при разряде

$$I = \frac{d}{dt}(C_6 \cdot U_6) = U_0 \cdot \omega \cdot C_6 \cdot \sin \omega t. \quad (12.10)$$

Так как $\epsilon_6 > \epsilon_r$, то суммарная емкость озонатора меньше емкости барьера, и при возникновении разряда ток скачком возрастает.

Как уже говорилось выше, кривая тока через озонатор при разряде имеет сложную форму, учитывающую импульсы тока отдельных разрядов. Поэтому обычно пользуются понятием среднего тока через озонатор при разряде, соответствующего двухполупериодной схеме выпрямления

$$I_{cp} = (U_0 - U_{гор}) \frac{2}{\pi} \omega C_6. \quad (12.11)$$

Очень важной характеристикой, определяющей не только интенсивность ионизационных процессов в газовом промежутке, но и эффективность образования озона, является активная мощность разряда P , с ростом которой выход озона возрастает. Правильная оценка активной мощности при работе озонатора позволяет определить эффективность работы устройства в целом.

Расчет активной мощности в цепи переменного тока проводится по уравнению

$$P = \frac{1}{T} \int i U dt = \frac{1}{2\pi} \int i U d(\omega t). \quad (12.12)$$

Если этот интеграл разбить на участки, соответствующие интервалам, когда разряд в промежутке есть и когда его нет, и на каждом участке использовать свои уравнения для напряжения и тока, то можно получить уравнение для активной мощности вида

$$P = U_{гор} \left[\frac{2(U_0 - U_{гор})C_6\omega}{\pi} - \frac{2U_r\omega C_r}{\pi} \right], \quad (12.13)$$

где первое слагаемое в квадратных скобках соответствует среднему по схеме двухполупериодного выпрямления току через озонатор при горении разряда, а второе слагаемое – среднему току в момент зажигания разряда, когда напряжение на промежутке становится равным пробивному. С небольшой погрешностью это напряжение можно считать равным напряжению горения разряда. Ток, соответствующий этому напряжению, называют критическим.

Тогда уравнение для мощности приобретает вид

$$P = U_{\text{гор}} (I_{\text{ср}} - I_{\text{кр}}), \quad (12.14)$$

Это уравнение используется для определения мощности при построении вольт-амперной характеристики. Этот метод использован и в данной работе.

Метод состоит в том, что измеряют выпрямленный по схеме двухполупериодного выпрямления ток через озонатор при изменении напряжения, приложенного к электродам, и строят вольт-амперную характеристику $I = f(U)$. До начала разряда эта характеристика имеет вид прямой с наклоном, обусловленным сопротивлением всего озонатора (рис. 12.7). После зажигания разряда ток определяется в основном емкостью барьера, и наклон прямой меняется. Точка излома соответствует критическому режиму, при котором ток равен $I_{\text{кр}}$. Если продлить разрядную часть вольт-амперной характеристики до пересечения с осью напряжения, то точка пересечения дает напряжение горения разряда $U_{\text{гор}}$.

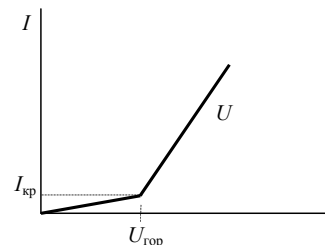


Рис. 12.7 Вольт-амперная характеристика озонатора

Зная значения $I_{\text{кр}}$ и $U_{\text{гор}}$, можно найти мощность для любого значения напряжения по соответствующему значению $I_{\text{ср}}$.

Основными параметрами, определяющими эффективность работы барьерного озонатора, являются: напряжение на электродах U ; газовый зазор l (эта величина определяет характер разряда и его интенсивность); диэлектрическая проницаемость материала барьера ϵ_0 ; частота f воздействующего напряжения и расход газа v_r , определяющий концентрацию озона в выходящей из озонатора газовой смеси.

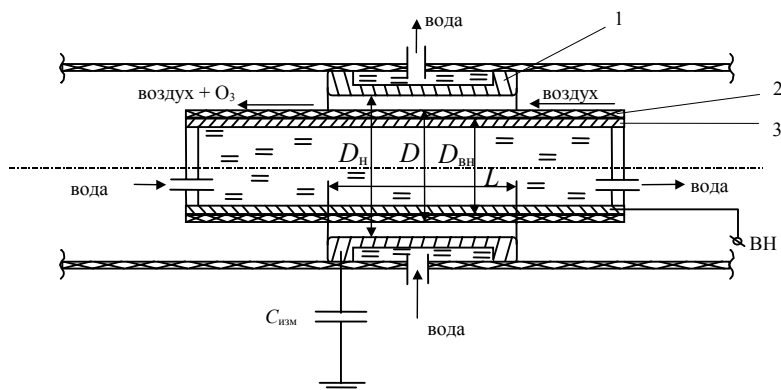


Рис. 12.8 Трубчатый барьерный озонатор

1 – наружный электрод; 2 – барьер из стекломали; 3 – внутренний электрод.

Для выноса образовавшегося озона из разрядного промежутка необходимо создать равномерный поток газа через разрядную зону. Наиболее удобно это осуществляется в коаксиальной системе электродов, так называемого, трубчатого озонатора (рис. 12.8).

От скорости протекания газа через озонатор, или от расхода газа v_r (л/мин) зависит время пребывания каждого единичного объема газа в зоне разряда. Это означает, что число разрядов, развивающихся в каждом единичном объеме газа при движении его вдоль озонатора зависит от v_r , т.е. концентрация озона на выходе из озонатора зависит от расхода газа.

С расходом газа связана производительность озонатора

$$G = C_{O_3} \cdot v_r, \quad (12.15)$$

измеряемая в граммах (или килограммах) озона в час. Наряду с концентрацией озона в воздухе на выходе озонатора C_{O_3} (г/л) производительность G является важной характеристикой озонатора.

Следующей важной величиной, определяющей эффективность работы озонатора, являются удельные затраты энергии на получение озона

$$W = \frac{P}{G} \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}.$$

Эта величина имеет особо важное значение для промышленных озонаторов с производительностью до 150 кг/час.

12.2.3. Технологическое применение озона

Исторически применение озона началось с установок по подготовке питьевой воды, когда в 1898 году в городе Сан Мор (Франция) прошли испытания первой опытно-промышленной установки. Уже в 1907 году был построен первый завод по озонированию воды в городе Бон Вуаяж (Франция), который обрабатывал 22500 кубических метров

воды из реки Вазюби в сутки для нужд города Ниццы. В 1911 году была пущена в эксплуатацию станция озонирования питьевой воды в Санкт-Петербурге. В 1916 году действует уже 49 установок по озонированию питьевой воды.

К 1977 году во всем мире действует более 1000 установок. В настоящее время 95% питьевой воды в Европе проходит озонную подготовку. В США идет процесс перевода с хлорирования на озонирование. В России действуют несколько крупных станций (в Москве, Нижнем Новгороде и ряде других городах). Приняты программы перевода на озонирование еще нескольких крупных станций водоподготовки.

В последние 20 лет области применения озона значительно расширились и во всем мире ведутся новые разработки. В таблицу 12.1 сведены и классифицированы основные технологические применения озона. Следует обратить внимание на то, что столь бурному развитию технологий с использованием озона способствует его экологическая чистота. В отличие от других окислителей озон в процессе реакций разлагается на молекулярный и атомарный кислород и предельные оксиды. Все эти продукты, как правило, не загрязняют окружающую среду и не приводят к образованию канцерогенных веществ, как например при окислении хлором или фтором.

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОЗОНА

Очистка природных и сточных вод	Очистка газовых выбросов	Сельское хозяйство и пищевая промышленность	Медицина и ветеринария	Химическая промышленность	Бытовые применения
Централизованные системы подготовки питьевой воды	Очистка газовых выбросов ТЭС от оксидов азота и серы	Подготовка воды и кормов для животноводства	Озонотерапия и профилактика проф. заболеваний	Добыча редких металлов и их выделение из сточных вод	Кондиционирование воздуха помещений
Автономные системы подготовки питьевой воды	Очистка воздуха помещений лакокрасочного и др. производств	Дезинфекция тары, помещений и оборудования	Применение в хирургии и послехирургической профилактике	Синтез новых полимеров	Очистка воды в плавательных бассейнах
Очистка промышленных сточных вод	Санация воздуха помещений промышленных предприятий	Хранение и транспортировка продуктов питания	Стерилизация медицинского инструмента и оборудования	Органический синтез и биотехнологии	Консервирование пищевых продуктов
Очистка биологически загрязненных вод		Промышленное интенсивное рыбоводство	Санация воздуха помещений для борьбы с внутрибольничными инфекциями	Отбеливание целлюлозы и тканей	Дезодорирование воздуха в рефрижераторах, пылесосах и т.д.

1) **Подготовка питьевой воды.** Применение озона для подготовки питьевой воды относится к самым ранним использованиям окислительных и дезинфицирующих свойств озона. Первоначально озон использовался только для обеззараживания, затем его стали применять для удаления запаха, изменения цветности воды и устранения примесей.

Обеззараживание – это удаление из воды бактерий, спор, микробов и вирусов (инактивация). Для удаления бактерий в воду вводят дезинфицирующее вещество. Чем больше дезинфицирующего вещества введено, тем эффективнее его воздействие на бактерии. Доза дезинфицирующего вещества (минимальное количество дезинфицирующего вещества в миллиграммах, необходимое для инактивации одного литра обрабатываемой воды) варьируется в зависимости от содержания в воде органических веществ, от температуры воды и от величины активной реакции воды с дезинфицирующим веществом – pH. На рис. 12.9 приведен график зависимости количества бактерий, содержащихся в воде, от величины дозы воздействующего дезинфицирующего вещества (в нашем случае хлора D_{Cl} и озона D_{O_3}).

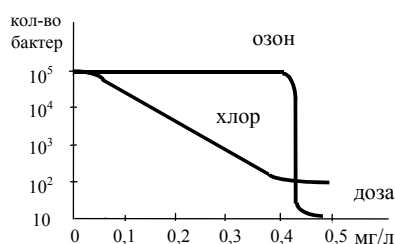


Рис. 12.9. Количество бактерий в воде в зависимости от дозы дезинфектанта

Из графика видно, что при использовании хлора, чем больше его дозировка в обрабатываемую воду, тем меньшее количество бактерий выживает. Для озона обнаруживается резкое бактерицидное действие при достижении критической дозы озона равной 0,4÷0,5 мг озона в газе на литр обрабатываемой воды. Причем, происходит полная инактивация воды.

Механизм воздействия окислителя состоит в разрушении бактерий путем инактивации бактериальных протеинов, то есть диффузией через мембрану клетки в цитоплазму с поражением жизненных центров.

Исследования механизма озонирования бактерий показали, что действие его происходит быстро при условии поддержания нужной концентрации растворенного озона в воде в течение определенного времени. Если озон эффективно воздействует на бактерии, то хлор производит только выборочное отравление жизненных центров бактерий, причем довольно медленное из-за необходимости длительного времени для диффузии в цитоплазму.

Время необходимое для снижения концентрации бактерий до допустимой величины, характеризуемой коли-индексом, называется временем инактивации.

Для хлора время инактивации составляет 30 мин при содержании остаточного хлора в воде в пределах $C_{вCl} = 0,05 \div 0,2$ мг/л.

Для озона это время составляет 12 мин при содержании растворенного озона в воде $C_{вO_3} = 0,1 \div 0,3$ мг/л.

Во Франции для инактивации воды принято время равное 4 мин при концентрации озона в воде $C_{вO_3} = 0,4$ мг/л.

Учитывая, что время инактивации в сильной степени зависит от концентрации остаточного озона в воде, в США введено в практику использование так называемого СТ – фактора [мг/л·мин], который устанавливает связь между необходимым временем инактивации и концентрацией растворенного озона в воде.

Таблица 12.2

Зависимость СТ-фактора от степени инактивации воды и ее температуры

(рН=6+9)

Уровень инактивации	Температура воды, °С					
	0,5	5	10	15	20	25
0,5	0,53	0,44	0,37	0,27	0,2	0,13
1,0	1,13	0,67	0,53	0,47	0,35	0,2
2,0	2,2	1,33	1,13	0,87	0,67	0,53
3,0	3,0	2,0	1,67	1,3	1,0	0,67

Из таблицы видно, что чем выше уровень (порядок снижения количества бактерий в воде) инактивации воды, то есть меньшее количество бактерий должно остаться в воде, тем большее должно быть значение СТ–фактора. Кроме того, чем выше температура воды, тем меньше СТ–фактор. Например, при температуре воды + 25°С и остаточной концентрации озона в воде 1 мг/л для инактивации на три порядка необходимо время обработки воды озоном равное 0,67 мин.

Кроме большой способности уничтожения бактерий озон обладает высокой эффективностью в уничтожении спор, цист (плотные оболочки, образующиеся вокруг одноклеточных организмов, например, жгутиковых и корненожек, при их размножении, а также в неблагоприятных для них условиях) и многих других патогенных микробов.

Обесцвечивание – это удаление из воды органических и химических веществ, окрашивающих воду. В зависимости от цветности исходной воды требуется большее или меньшее количество озона для обесцвечивания воды.

В России для поверхностных вод средних и северных районов для доведения цветности воды до нормы в 20° обычно требуется доза озона $D_{oz} = 2,5$ мг/л.

Для южных районов, где исходная цветность воды значительно больше, требуется уже доза озона, равная 8 мг/л (см. рис. 12.10).

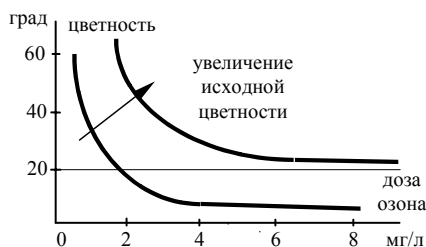


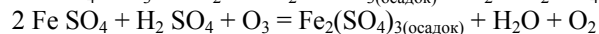
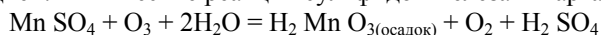
Рис. 12.10. Зависимость обесцвечивания Воды от дозировки озона

Физический механизм воздействия озона при обесцвечивании воды заключается, во-первых, в разложении веществ до простейших H_2O и CO_2 , во-вторых, в коагуляции (объединении) веществ с дальнейшим выпадением их в осадок.

Эффективное обесцвечивание воды озонированием является одним из определяющих критериев в выборе озона в качестве воздействующего реагента при подготовке питьевой воды.

Удаление железа и марганца. В природных водах наиболее часто встречается железо в двухвалентной форме, находящееся в растворенном состоянии. Марганец в природной воде обычно сопутствует железу. Оба этих вещества придают воде цветность и характерный привкус. Озон легко

окисляет соли железа и марганца с образованием нерастворимых веществ, которые удаляются отстаиванием или фильтрацией. Химические реакции сульфидов железа и марганца с озоном можно записать в виде:



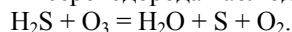
Если железо и марганец содержатся в форме органических соединений или коллоидальных частиц (с размером $0,1 \div 0,01$ мкм), то обезжелезивание и деманганация воды обычными способами не удастся. В этом случае необходимо предварительное окисление этих комплексных органических соединений, приводящее к их расщеплению, после чего становится возможным удаление железа и марганца одним из обычных методов. Окисляя комплексные соединения, озон преобразует растворимые соли в нерастворимые, поэтому необходимо последующее фильтрование воды для освобождения ее от выпадающих осадков.

Следует отметить, что хотя озонирование и не является наиболее экономичным методом обезжелезивания и деманганации, но применение озона с этими целями оправдано в двух случаях: во-первых, когда обычные способы удаления из воды железа и марганца не дают результатов или ведут к недостаточным результатам, во-вторых, когда необходимо одновременное устранение запахов, привкусов и цветности воды.

Устранение привкусов и запахов воды. Неприятные привкусы и запахи в некоторых природных водах вызываются присутствием соединений минерального и органического происхождения, находящихся в растворенном или коллоидном состоянии. Эти привкусы по своему происхождению могут быть:

- а) минерального происхождения, т.е. вызываемые наличием железа, марганца, сероводорода и общей повышенной минерализацией;
- б) природного органического происхождения – гуминовые кислоты, органические вещества, поступающие со стоками, водоросли и чаще всего планктон;
- в) городского происхождения – продукты распада органических веществ в городских отбросах;
- г) промышленного происхождения – различные химические стоки, моющие средства, углеводороды, гудрон и др. смолы;
- д) сельскохозяйственного происхождения – пестициды, гербициды, минеральные удобрения.

Озон окисляет названные выше соединения, приводя к их расщеплению, сопровождающемуся исчезновением привкусов и запахов. Таким образом происходит нейтрализация веществ путем своего рода «холодного сжигания». Например, при окислении сероводорода наблюдается выделение серы:



Благодаря более высокой окислительной способности, озон в состоянии действовать на такие соединения, которые не подвергаются воздействию других химических реагентов. Обработка воды избыточным количеством озона не влечет за собой никаких нежелательных явлений: избыточный озон, будучи нестойким, снова превращается в кислород в течение нескольких минут. Озонирование не создает дополнительных или замещающих соединений, тогда как хлор дает с некоторыми веществами сложные соединения, вызывающие появление весьма резких запахов. Например, при обработке хлором воды, содержащей примесь фенолов, образуется хлорфенол, имеющий весьма неприятные привкус и запах. Наконец, при обработке озоном вода насыщается кислородом, что приводит к эффекту родниковой воды.

Рассмотрим принципиальную технологическую схему установки для комплексной очистки питьевой воды. В данной установке реализована традиционная схема очистки воды озонированием и фильтрованием. Схема установки показана на рис. 12.11.

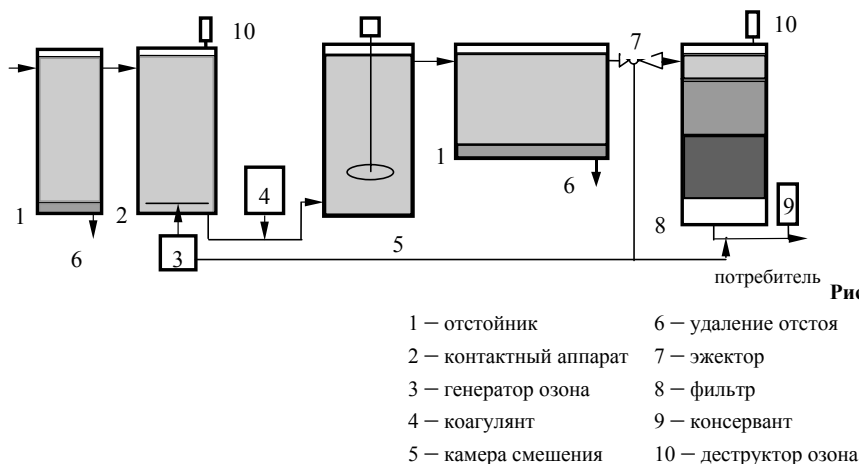


Рис. 12.11. Схема подготовки питьевой воды

Перед поступлением в установку из воды, забираемой в водоеме, сначала входным фильтром грубой очистки, а затем в отстойнике 1 удаляются механические примеси. Далее вода поступает на обработку реагентами. Обычно используется схема с пред- и постозонированием. Предозонирование воды осуществляется после удаления механических примесей и производится в контактном аппарате 2. Озон в контактный аппарат поступает от генератора озона 3. Предозонирование имеет целью проведения первичного обеззараживания воды, удаления цветности, окисления и перевода в коллоидное состояние растворенных металлов. Одновременно озонирование воды способствует реализации процесса флокуляции (явление слабого хлопьеобразования – коллоидальной мутности вод). Образовавшиеся нерастворимые вещества удаляются из воды отстаиванием в специальных аппаратах – отстойниках 1. Часто для усиления процесса флокуляции после предозонирования в воду добавляют специальные вещества – коагулянты 4, способствующие процессу слияния частиц в крупные агломераты и более быстрому выпадению их в осадок. К таким веществам относятся сульфат алюминия и хлорное железо. Для улучшения смешивания коагулянтов с водой в камерах смешения 5 осуществляют интенсивное перемешивание воды и коагулянта. После отстойника вода с оставшимися в ней загрязнителями подвергается повторному озонированию, целью которого является проведение промежуточной дезинфекции и окисления органических веществ.

В нашем примере введение озона в воду осуществляется с помощью эжектора 7. Вода с расщепленными органическими веществами поступает в фильтр 8, который может быть или комбинированным с песчаной и угольной загрузкой, или состоящим из двух фильтров, загруженных соответственно песком и активированным углем. Установлено, что комбинированная очистка «озонирование-фильтрация на активированных углях» позволяет эффективнее использовать сорбционную загрузку фильтров. Причиной является насыщение воды кислородом при ее озонировании, что создает благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий в толще угольной загрузки, обеспечивающих биологическое окисление загрязнений в порах загрузки и таким образом увеличивающих срок использования активированного угля до его регенерации. После фильтрации вода подвергается озонированию для окончательной дезинфекции и придания необходимых вкусовых качеств. В качестве смешивающих устройств здесь

используются контактная камера или комбинация из эжектора и турбулизатора (на рис. 12.11 не показаны). На выходе к потребителю вода консервируется хлором 9, не позволяющим развитию бактерий в воде при ее транспортировке по трубопроводу.

2) **Подготовка воды в плавательных бассейнах.** Требования, предъявляемые к воде в плавательных бассейнах, аналогичны требованиям к питьевой воде. В связи с этим идентичны и основные стадии обработки воды: удаление примесей фильтром грубой очистки (волосоловкой), озонирование воды в контактной камере, удаление взвесей, образующихся в воде, песчаными и сорбционными фильтрами, консервация воды хлором с дозировкой $C_{cl} = 0,05 \div 0,1$ мг/л. Однако в отличие от предыдущего случая вода движется по замкнутому циклу с добавлением лишь 10 % свежей воды.

3) **Обработка сточных вод.** Механизм воздействия озона на загрязнения природных и сточных вод идентичен: это – молекулярное окисление и атака активными радикалами. В значительной степени механизм окисления обусловлен дипольностью молекулы озона, которая фиксируется на заряженных частицах и разрывает двойные связи с образованием окисленных форм. Полярный характер молекулы позволяет также использовать озон в процессе каталитического окисления совместно с Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ультразвуком, ультрафиолетовым излучением.

Степень загрязнения сточных вод часто характеризуют показателями «химического поглощения кислорода (ХПК)» и «биологического поглощения кислорода (БПК)», которые показывают какое количество кислорода в мг идет на окисление примесей в 1 л воды.

При высоких концентрациях загрязнителей, приводящих к значительному потреблению озона, для снижения концентрации удаляемых веществ с помощью озона, в начало цикла (рис. 12.12) после аэрации ставится система биологической очистки воды с использованием микроорганизмов: бактерий, простейших червей, плесневых грибов, дрожжей и др. В этом случае если на входе БПК и ХПК ~1000, после аэротена ~500, после биофильтра ~30÷50, то после озонирования ~5. Таким образом, озон используется на выходе очистной системы для доведения воды до требуемой кондиции.

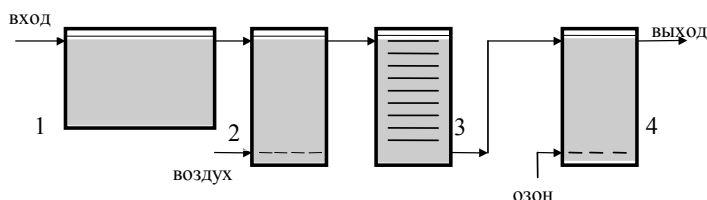


Рис. 12.12. Биологическая очистка сточных вод с использованием озона
1 – отстойник; 2 – аэротен; 3 – биофильтр; 4 – контактный аппарат

4) **Медицинские технологии.** Применение озона для профилактики и лечения заболеваний основано на широком спектре терапевтического воздействия различных доз озона на организм. Озон действует как иммуномодулирующее, противовоспалительное, бактерицидное, противовирусное, фунгицидное, цитостатическое, антистрессовое, анальгезирующее средство.

Озонотерапия эффективно используется в следующих случаях: болезни верхних дыхательных путей и легочные заболевания, инфекционные болезни (для инактивации вирусов, бактерий, лечения гепатитов), в хирургии (язвы, пролежни, свищи, гангрены, ожоги), в кожно-венерологической практике (экземы, дерматиты), в онкологии, в физиотерапии и курортологии, зубоврачебной практике, а также в гигиене и санитарии. Во многих случаях терапевтическое воздействие озона основано на более легком его проникновении в больные клетки, чем в здоровые.

Озон применяется как при низких концентрациях в газе (на уровне ПДК), например, при лечении легких и верхних дыхательных путей, так и при высоких концентрациях, например, для растворения озона в физиологическом растворе и в дистиллированной воде, или при осуществлении обработки озоном крови больных (аутогемотерапия).

Для стерилизации медицинского инструмента также применяется вода с растворенным в ней озоном.

В медицинских установках имеет важное значение высокая концентрация озона в газе для ускорения процесса насыщения жидкости. В качестве смесителя используется барботажная камера.

5) **Очистка отходящих газов.** Воздушные выбросы не столь разнообразны по составу как сточные воды. Они содержат почти всегда окись азота и серы, сероводород, летучую органику. В ряде случаев наблюдаются выбросы фтора, окиси ванадия и синильной кислоты.

В связи с тем, что озон реагирует в жидкой среде гораздо быстрее, чем в газовой и, кроме того, в этом случае легче управлять процессом окисления, то практически всегда очистку воздушных выбросов производят пропусканием последних через специальные поглотительные растворы, используя для этой цели поглотительные колонны или другие аналогичные устройства.

6) **Применение озона в сельском хозяйстве.** Широкий спектр областей применения озона в сельском хозяйстве: растениеводство, животноводство, рыбоводство, кормопроизводство и хранение продуктов, обуславливает множество озонных технологий, которые условно можно разделить на два больших направления. Первое имеет целью стимулировать жизнедеятельность живых организмов. С этой целью применяются концентрации озона на уровне ПДК, например санация помещений с животными и растениями для улучшения комфортности их пребывания. Второе направление связано с подавлением жизнедеятельности вредных организмов или с устранением вредных загрязнений из окружающей атмосферы и гидросферы. Концентрации озона в этом случае намного превышают значения ПДК. К таким технологиям относятся дезинфекция тары и помещений, очистка газовых выбросов птицеферм, свиноводников, обезвреживание сточных вод сельскохозяйственных предприятий и т.д.

12.3. Технологии конверсии газов в плазме газового разряда

Вопрос конверсии газов в плазме газового разряда необходимо рассматривать как с точки зрения преобразования токсичных соединений в нетоксичные, так и с точки зрения изменения физико-химических свойств обрабатываемых плазмой веществ для их использования в реакциях последующего синтеза или в специальных технологических процессах.

Основными источниками токсичных газообразных загрязнений являются:

— Тепловые электрические станции, при этом главными загрязняющими компонентами являются оксиды серы (SO_2) и оксиды азота (NO_x). Например, для тепловой электростанции мощностью $P = 800$ МВт, использующей низкокалорийный бурый уголь с расходом 6 млн. тонн в год и с содержанием серы $S = 1,5\%$, выбрасывается в год в атмосферу до 170 тыс. тонн диоксида серы SO_2 .

— Черная и цветная металлургия. Наиболее серьезным газовым выбросом также является диоксид серы.

— Химическая промышленность. Наиболее важными газообразными загрязняющими веществами, с учетом объемов их производства и токсичности, являются хлор, оксиды азота и серы, фтор и его соединения, углеводороды и их хлорпроизводные.

Традиционными методами очистки газов от вредных газообразных примесей являются:

1. Химико-каталитические методы (каталитическое окисление – химические превращения токсичных компонентов в нетоксичные на поверхности твердого катализатора).
2. Адсорбционные методы (абсорбция в объеме жидкости – физическая и химическая – хемосорбция; абсорбция на поверхности пористых тел).
3. Термические методы (метод прямого сжигания в пламени).

В последние годы интенсивно развиваются технологии очистки газообразных загрязняющих выбросов с использованием новых нетрадиционных методов:

4. На основе радиационного облучения.
5. Путем бомбардировки газа элементарными частицами высокой энергии, полученными в ускорителях (например, пучком ускоренных электронов).
6. С использованием плазмы газового разряда (наносекундной импульсной короны).

Достоинством последнего метода являются технологичность, возможность одновременного удаления целого ряда вредных примесей, относительно малая энергоемкость и стоимость.

Процесс конверсии газов под действием импульсного коронного разряда заключается в следующем. На стадии развития стримеров в газовой среде в резко неоднородном поле под действием сильного поля в головках стримеров ($E \sim 150 \text{ кВ/см}$) электроны приобретают энергию порядка $5 \div 15$ эВ, достаточную для возбуждения, диссоциации и ионизации молекул газа и образования радикалов и химически активных частиц (например, O , OH^\cdot , H_2O_2 и др.). На втором этапе радикалы и активные частицы взаимодействуют с оксидами азота и серы, органическими газообразными примесями, окисляя, разлагая или преобразуя их в продукты, более просто удаляемые из газа.

Оценим энергии связей между атомами, энергии метастабильных состояний молекул и атомов, энергии ионизации наиболее часто встречающихся атомов и молекул.

Таблица 12.3

Энергии связи (диссоциации)					
Связь	C – C	C = C	C – H	C – N	C = N
Энергия диссоциации, эВ	3,61	6,35	4,3	3,17	9,26
		2,74(π -связь)			

Таблица 12.4

Энергии диссоциации, метастабильных состояний

и ионизации газов			
Газ	Энергия диссоциации, эВ	Энергия метастабильного состояния, эВ	Энергия ионизации, эВ
He	–	19,8	24,6
Ne	–	16,6	21,6
A ₂	–	11,5	15,8
K ₂	–	9,9	14,0
Xe	–	8,32	12,1
H ₂	4,2	8,4	15,6
N ₂	9,8	6,2	15,5
O ₂	5,1	0,98	12,5

Из таблиц видно, что энергия связей меньше энергии ионизации, поэтому в плазме газового разряда концентрация свободных радикалов будет на несколько порядков больше, чем концентрация ионов.

Саму же эффективность такого плазмо-химического реактора принято выражать путем введения G-фактора – числа наработанных активных частиц, отнесенного к энергозатратам в разряд (выраженному в 100 эВ).

В импульсном разряде зависящий от времени G-фактор для сорта частиц j дается выражением:

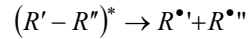
$$G_j(t) = \frac{N_j(t)}{\int_0^t (UI)(t') dt'}$$

где N_j – полное число частиц сорта j (интеграл по объему разряда), наработанное к моменту времени t ; U и I – зависящие от времени напряжение и ток разряда.

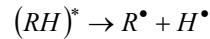
Радикалы (в общем виде они обозначаются буквой R) образуются в результате следующих процессов.

1. Диссоциации возбужденных молекул:

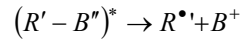
а) через распад молекулы



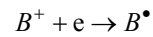
б) через отрыв атома водорода



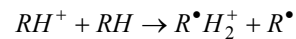
2. Диссоциации ионов:



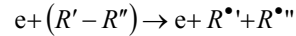
3. Нейтрализации ионов:



4. Ионно-молекулярных реакций:



5. Прямого электронного удара:



Рассмотрим теперь очистку топочных газов от оксидов азота и серы. Топочный газ обычно состоит из азота N_2 , кислорода O_2 , углекислого газа CO_2 , воды H_2O , оксидов азота NO_x и оксида серы SO_2 .

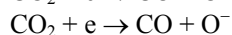
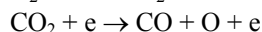
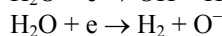
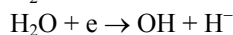
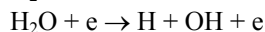
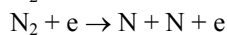
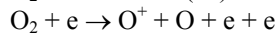
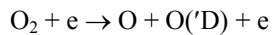
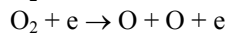
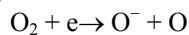
Требования к плазме газового разряда:

- плазма должна быть резко неравновесной $T_e \gg T_i$, чтобы на вещества воздействовали электроны, а газ не нагревался, то есть тепловые потери были минимальны,
- равномерное заполнение объема с обрабатываемым газом плазмой газового разряда,
- возможность регулирования энергии воздействующего разряда.

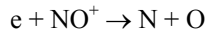
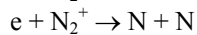
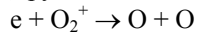
Данным требованиям удовлетворяет плазма импульсного газового разряда.

Одновременная очистка топочных газов от оксидов азота и серы при применении наносекундной импульсной короны основывается на процессах окисления NO и SO_2 , вызванного активными частицами (OH , H_2O_2 , O и др.). Эти активные частицы инициируют химическую конверсию NO и SO_2 в присутствии кислорода и водяного пара в NO_2 , HNO_2 , HNO_3 , ..., и, соответственно, в SO_3 , H_2SO_3 , H_2SO_4 , ...

Активные частицы нарабатываются в головках стримера при столкновении электронов с молекулами газов, входящих в состав топочного:

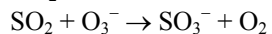
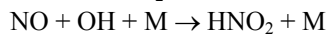
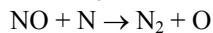
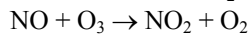
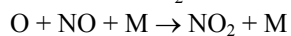
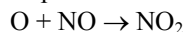


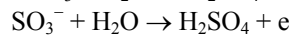
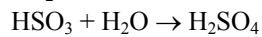
Другим источником активных частиц являются реакции электрон-ионной рекомбинации:



Константы скоростей реакций являются функциями приведенной напряженности электрического поля E/N и зависят от состава топочного газа.

Наработанные активные частицы вступают в реакцию с оксидами азота и серы:





Сначала все эти реакции проходят в газовой фазе. Так как давление насыщения азотных и серных кислот низкое, то они взаимодействуют с водяным паром, образуя капельный аэрозоль. Для нейтрализации кислот добавляется аммиак. Капли аэрозоля хорошо абсорбируют и оксиды, и аммиак. Аммиак в присутствии кислорода и паров воды окисляет часть диоксида серы и взаимодействует с кислотами с образованием нитратов и сульфатов аммония в твердом состоянии.

Схематично диаграмму очистки топочного газа можно представить в следующем виде (рис. 12.13).

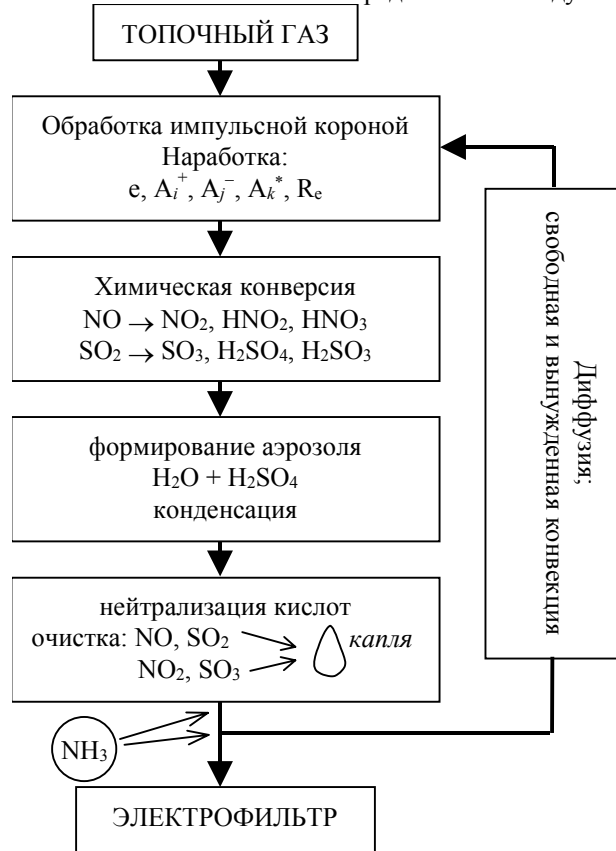


Рис. 12.13. Схема стадий очистки топочных газов

Сам технологический цикл очистки топочных газов от окислов азота и серы, например, на тепловой электростанции, выглядит следующим образом (рис. 12.14).

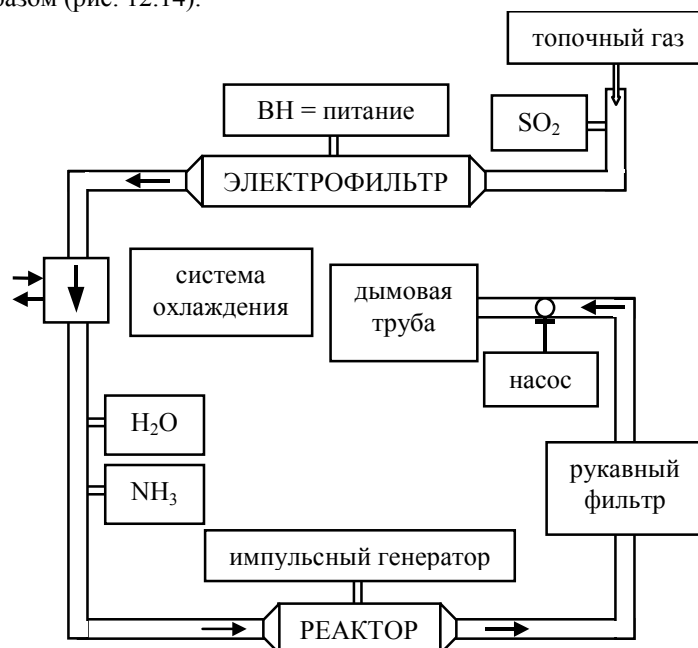


Рис. 12.14. Технологическая схема очистки топочных газов

Газ, при температуре 150°C, проходит через электрофильтр, где извлекаются твердые примеси, а затем охлаждается до 65°C в градирне. Испаряющаяся вода не только отбирает тепло от топочного газа, но и увеличивает его влажность, которая необходима для процессов удаления оксидов серы и азота в плазменном реакторе.

В реакторе охлажденный топочный газ подвергается воздействию импульсного коронного разряда. Системы электродов, используемые для получения плазмы, представлены на рис. 12.15.:

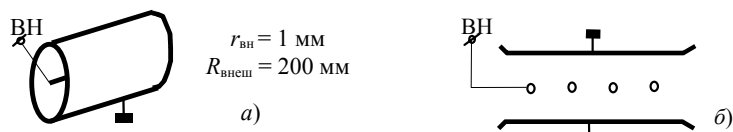


Рис. 12.15. Системы электродов устройств для создания плазмы импульсного газового разряда
а) коаксиальные цилиндры; б) ряд проводов между плоскостями

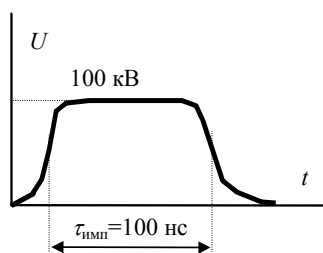


Рис. 12.16. Форма импульса напряжения

Форма импульса питающего напряжения представлена на рис. 12.16.: Питающее напряжение имеет такую форму, чтобы разряд не переходил в свою завершающую стадию. Поэтому разряд носит форму стримеров, которые пересекают весь газовый промежуток, а перерастание их в лидерную стадию не происходит, так как питающее напряжение резко обрезают.

Импульсные источники питания

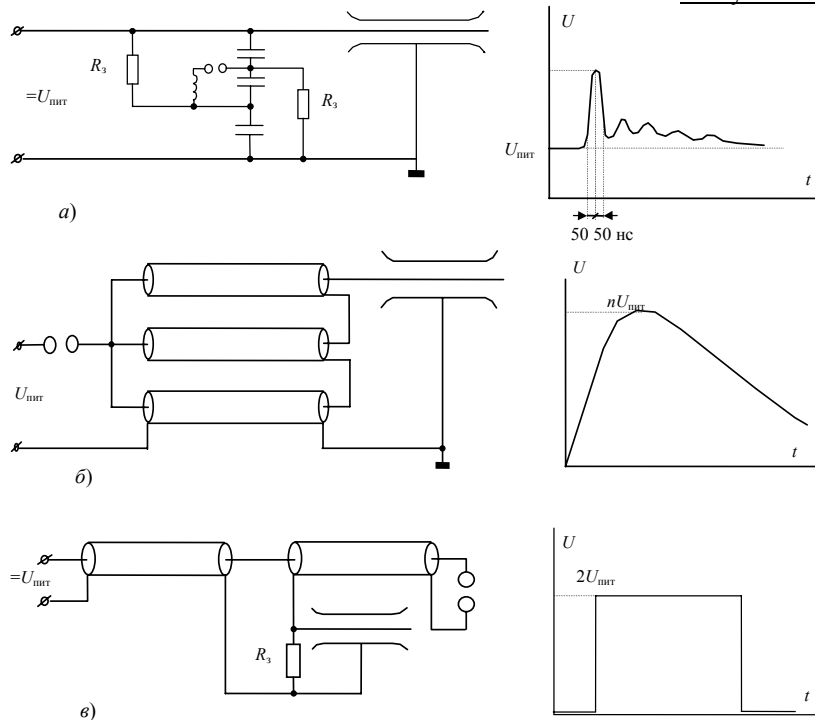


Рис. 12.17. а) Схема Фитча; б) кабельный трансформатор; в) схема Блюмляйна

Перед реактором к газу добавляется аммиак, чтобы нейтрализовать кислоты, получающиеся при реакциях оксидов с радикалами, образованными в разряде.

Затем поток газа проходит через коллектор продукта, где соли аммония (порошок) собираются как удобрение.

12.4. Модификация поверхности материалов в плазме газового разряда

В широком смысле под модификацией поверхности материалов в плазме газового разряда понимается изменение свойств поверхности при участии низкотемпературной газоразрядной плазмы. Свойства поверхности обрабатываемого материала изменяются в результате физико-химических процессов, происходящих на границе раздела газ (газовая среда)–твердое тело:

- за счет разрыва старых и образования новых связей исходного материала,
 - за счет нанесения и привития к поверхности материалов других веществ.
- При модификации поверхности материала протекают две конкурирующие реакции (процесса):
- образование пленки вещества путем осаждения из газовой фазы,
 - травление, которое приводит к удалению веществ с поверхности материала.

На рис. 12.18 приведена схема модификации поверхности твердого тела в плазме газового разряда.

При наличии процессов модификации можно выделить три случая:

- а) плазма является одновременно средой проведения, источником участвующих в процессе частиц и стимулятором (активатором) процесса;
- б) плазма служит только для активации участвующих в процессе частиц;
- в) плазма используется только для активации участвующих в процессе частиц поверхностей или для стимуляции самого процесса.

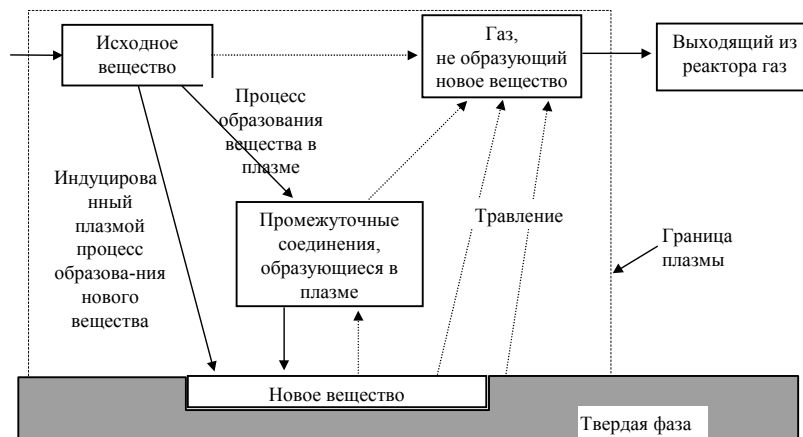


Рис.12.18. Схема модификации поверхности в плазме газового разряда

В первом случае обрабатываемая поверхность твердого тела находится в контакте с плазмой, во втором – вне плазмы, в третьем – возможны оба варианта.

Различные процессы обработки можно объединить в три большие группы:

1. Собственно сама модификация поверхностных слоев материалов (окисление, нитридизация, анодизация и др.).
2. Удаление материала с поверхности твердого тела (все виды распыления, травления и очистки).
3. Нанесение пленки материала на поверхность твердого тела.

Как пример, рассмотрим модификацию поверхности полимерных материалов, в которых она имеет наиболее широкую гамму технологических приложений.

Все изменения физических и химических свойств тонкого поверхностного слоя полимера начинаются с изменения его химического состава и структуры. Причем, любые химические превращения в этом слое под действием неравномерной плазмы могут инициироваться только генерируемыми ею активными частицами, к которым относятся кванты УФ-излучения, электронно- и колебательно-возбужденные молекулы, свободные атомы и радикалы, а также заряженные частицы, бомбардирующие поверхность обрабатываемого материала.

При всем многообразии генерируемых в плазме активных частиц их действие на материалы ограничивается очень небольшим поверхностным слоем. В случае полимерных материалов его толщина, как правило, меньше 1 мкм. Таким образом, все технологические эффекты плазменной обработки полимерных материалов определяются набором физико-химических процессов, инициируемых активными частицами плазмы в тонком поверхностном слое.

Физико-химические и технологические эффекты плазменной обработки полимеров могут быть представлены в виде таблицы 12.2.

Таблица 12.2

Химические и физические изменения	Технологические эффекты
<p>1. Химические изменения поверхностного слоя.</p> <p>1А. Образование двойных связей и новых функциональных групп, например $-\text{OH}$; $-\text{CN}$; $=\text{NH}$; $-\text{C}=\text{O}$; $-\text{NH}_2$; $-\text{COOH}$; сшивка полимерных цепей.</p> <p>1В. Процессы деструкции:</p> <ul style="list-style-type: none"> • разрывы цепей макромолекул; • разрушение функциональных групп; • образование газообразных продуктов травления. <p>1С. Другие изменения:</p> <ul style="list-style-type: none"> • изменение эффективной степени полимеризации и средней молекулярной массы; • изменение степени окисления отдельных атомов в макромолекулах, например, атомов кислорода, изменение окислительно-восстановительных свойств поверхности. 	<p>Изменение смачиваемости, капиллярности, общего влагопоглощения.</p> <p>Возрастание насыщенности окраски, уменьшение времени окраски, улучшение печатных свойств.</p> <p>Модификация антиресорбционных свойств, уменьшение загрязняемости.</p> <p>Улучшение адгезионных свойств для нанесения покрытий и изготовления композитных материалов.</p> <p>Изменение растворимости поверхностного слоя в органических и неорганических растворителях.</p>
2. Изменение структуры поверхностного слоя.	Улучшение погодостойкости

<ul style="list-style-type: none"> • Изменение степени кристалличности. • Изменение температуры фазовых переходов. • Фазовые переходы, инициируемые плазмой. • Образование микродоменных структур. • Увеличение эффективной площади поверхности. • Изменение поверхностной пористости и проницаемости. • Изменение коэффициентов диффузии газов и жидкостей в полимерах. 	полимеров. Замедление миграции пластификатора к поверхности материала. Модифицирование свойств ион-обменных смол и ион-селективных мембран. Дезинфекция поверхности полимера. Придание полимерам биосовместимости.
3. Изменение физических свойств поверхностного слоя. <ul style="list-style-type: none"> • Изменение поверхностной энергии. • Изменение коэффициента поверхностного трения. • Изменение механических свойств. • Изменение спектров поглощения в ИК-, УФ- и видимой областях. • Изменение поверхностной проводимости, диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь. • Накопление поверхностного заряда. 	Возрастание прочности, эластичности и сопротивления трению. Уменьшение усадки и свойлачиваемости шерсти. Придание несминаемости тканям. Изменение окраски и блеска поверхности полимера. Сглаживание поверхности и уменьшение поверхностного трения. Придание требуемых электрических свойств, включая антистатические.

Травление – это операция повсеместного или локального удаления поверхностных слоев материала с целью очистки его от загрязнений или придания рельефа его поверхности.

По физико-химическому механизму воздействия частиц низкотемпературной газоразрядной плазмы на поверхность процессы травления можно разделить на три группы:

1. Ионное травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются только в результате физического распыления. Травление осуществляется энергетическими ионами газов (0,1÷5,0 кэВ), химически не реагирующими с обрабатываемым материалом (обычно ионами инертных газов).
2. Плазмо-химическое травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате химических реакций. Химические реакции происходят между химически активными частицами и поверхностными атомами с образованием летучих продуктов.
3. Ионно-химическое травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химических реакций между химически активными частицами и атомами материалов.

Наиболее широкое применение процесс травления нашел при изготовлении изделий электроники, когда необходимо в тонких пленках или в поверхностном слое полупроводниковой подложки сформировать топологический рисунок элементов схемы, существенно уменьшить размеры элементов структур с одновременным увеличением точности, надежности и автоматизации их производства.

Плазмохимические методы осаждения таких пленок дают возможность наносить тугоплавкие и многокомпонентные сплавы, диэлектрики, полупроводники, т.е. практически все материалы, изменяя структурные, механические, электрические, ферромагнитные и другие свойства твердой поверхности.

При ионном напылении пленочное покрытие получается распылением в плазме инертных газов материала мишени при подаче на нее отрицательного потенциала и бомбардировке ионами плазмы.

При ионно-плазменном напылении происходит нанесение сложных по составу пленочных покрытий распылением мишени в плазме, содержащей химически активный газ. В этом случае пленки на подложке формируются в результате химического взаимодействия распыленного материала и активного газа (метана, кислорода, азота).

13. ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛ

13.1. Введение

Технологии с использованием импульсных сильных токов относятся наряду со взрывными (использование взрывчатки) к высокоскоростным, при которых реализуется интенсивное силовое воздействие на обрабатываемый объект. Часто объекту при этом сообщается большая скорость, что открывает новые технологические возможности.

Например, появление пластических свойств у хрупких материалов (сплавы молибдена).

К ТЕХНОЛОГИЯМ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМ СИЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ТОКИ, ПРИНАДЛЕЖАТ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ (СИЛЬНОТОЧНЫЙ РАЗРЯД В ВОДЕ), ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (СОЗДАНИЕ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭТОГО ПОЛЯ НА ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ ОБЪЕКТ).

Рассмотрим электрофизические основы технологии.

13.2. Электрогидравлическая технология

13.2.1. Основные сведения

При импульсном электрическом разряде в жидкости происходит быстрое выделение энергии в канале разряда. В результате давление в канале разряда значительно превышает внешнее, канал быстро расширяется, что приводит к возникновению ударной волны и потоков жидкости.

Ударная волна представляет собой скачек плотности среды, распространяющейся от канала со скоростью, превышающей звуковую. Давление на фронте ударной волны в жидкости может достигать десятков килобар. Воздействие этого давления на обрабатываемый объект может вызывать структурную перестройку материала объекта (дробление хрупких материалов, деформацию, упрочнение поверхности и т.д.). Потоки жидкости, распространяющиеся со скоростью $10^2 \div 10^3$ м/с, передают кинетическую энергию обрабатываемому объекту, вызывая, как и ударная волна, его механические изменения.

Механические проявления импульсного разряда в жидкости принято называть электрогидравлическим эффектом, а установки с использованием этого эффекта – электрогидравлическими. В качестве рабочей среды в таких установках используется, как правило, техническая вода.

Обычно электрогидравлическая установка состоит из накопителя энергии НЭ (рис. 13.1), зарядного устройства ЗУ и технологического блока ТБ, содержащего некоторый объем жидкости, систему электродов, между которыми создается импульсный разряд, и обрабатываемый объект, располагаемый вблизи канала разряда К.

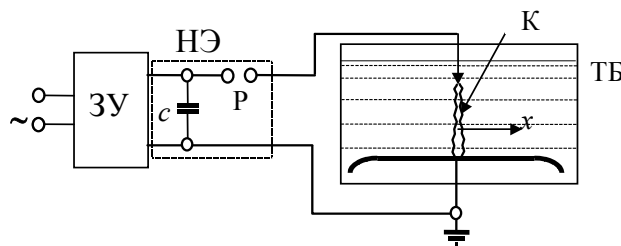


Рис.13.1. Принципиальная схема электрогидравлической установки

Накопитель энергии, как правило, представляет собой батарею импульсных конденсаторов высокого напряжения емкостью C . Конденсаторная батарея соединяется с электродной системой в технологическом блоке через разрядник P , наличие которого позволяет зарядить емкость C до требуемого напряжения от зарядного устройства ЗУ со сравнительно небольшим током. Соединение накопителя энергии с технологическим блоком выполняется малоиндуктивным, для чего используются специальные коаксиальные кабели высокого напряжения. Применение коаксиальных кабелей помимо уменьшения индуктивности разрядной цепи ослабляет электромагнитные поля вблизи работающей установки.

Разрядник P может быть управляемым или неуправляемым. Он представляет собой, как правило, двухэлектродный или трехэлектродный (тригатрон) воздушный искровой промежуток, в некоторых случаях помещаемый в звукоизолирующем корпусе. В установках с большой частотой следования разрядов промежуток разрядника продувается сжатым воздухом, а электроды охлаждаются водой.

Наличие технологического блока характерно для установок, предназначенных для обработки транспортабельных деталей или материалов (например, деталей в машиностроении и металлообработке, сырья в горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов и т.д.) В таких электрогидравлических установках, как установки для бурения, разрушения негабаритных кусков горных пород, для эхолокации водоемов, технологический блок отсутствует и вместо него используется перемещаемая электродная система, погружаемая в скважину, заполненную жидкостью, или в водоем.

Принцип работы типичной гидравлической установки поясняют графики изменения во времени основных электрических параметров, приведенные на рис. 13.2.

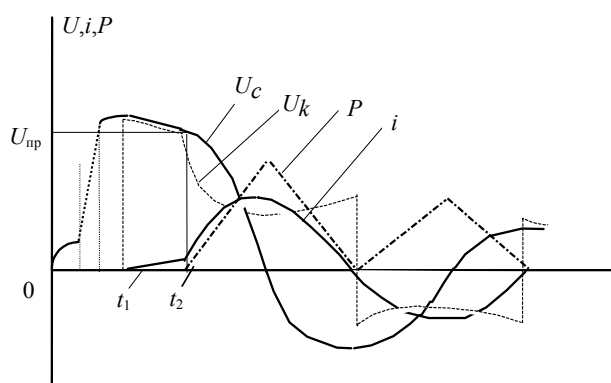


Рис. 13.2. Изменение напряжения на конденсаторе U_c , на канале разряда U_k , разрядного тока i и мощности P во времени t

До момента t_1 происходит зарядка накопителя: напряжение на конденсаторе C растет до $U_1 = 10^3 \div 10^5$ В. В момент t_1 накопитель подключается к искровому промежутку в жидкости и начинается процесс электрического пробоя промежутка. По завершении пробоя в момент t_2 наступает канальная стадия разряда. Напряжение U_c за время $t_2 - t_1$ несколько падает (до $U_{пр}$) из-за стекания заряда с конденсатора C вследствие электропроводности среды в промежутке. Если при пробое ток i , протекающий через промежуток, растет незначительно, то по завершении пробоя он резко возрастает. Обычно ток в течение канальной стадии имеет форму, близкую к синусоидальной с большим затуханием.

Форма напряжения на промежутке U_k отражает нелинейность сопротивления канала разряда. Импульс мощности P , развиваемой в канале, имеет форму, близкую к треугольной.

В тех случаях, когда потери энергии за время пробоя $t_2 - t_1$ в промежутке недопустимо велики или при рабочем напряжении не обеспечивается стабильный пробой промежутка при требуемом расстоянии между электродами, перед каждым разрядом электроды закорачиваются тонкой провололочкой, которая взрывается под действием тока.

При разряде или электрическом взрыве проволоочки в жидкости возникают ударная волна давления и пульсирующая по размерам газовая полость, изменение положения которых относительно оси канала во времени показано на рис. 13.3,а соответственно кривыми 1 и 2.

Канал разряда в начале процесса расширяется с максимальной скоростью. После прекращения протекания тока полость канала разряда вследствие инерционности окружающей среды продолжает расширяться, достигает предельных размеров и затем начинает сжиматься. При расширении полости температура и давление в ней падают, а при сжатии повышаются, что приводит к затухающим пульсациям полости. Обычно период колебаний полости на несколько порядков превышает длительность разряда. Максимальные размеры полости в зависимости от выделившейся энергии при разряде и от условий протекания гидродинамических процессов в технологическом блоке составляют от нескольких сантиметров до десятков сантиметров.

В случае применения взрывающейся проволоочки картина механических проявлений несколько изменяется (рис.13.3,б). С момента подключения накопителя t_1 начинается разогрев проволоочки и происходит сравнительно медленное увеличение ее диаметра. К моменту начала электрического взрыва t_3 от отдельных участков проволоочки отделяются слабые ударные волны, распространяющиеся со скоростью, близкой к скорости звука. В момент завершения взрыва t_4 возникает мощная ударная волна, обгоняющая ранее возникшие, и далее процесс протекает также, как и при разряде вследствие пробоя промежутка.

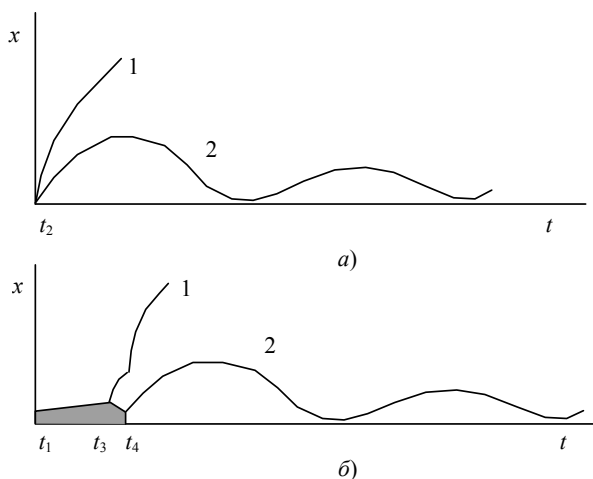


Рис.13.3. Изменение положения ударной волны (кривые 1) и границы газовой полости (кривые 2) при разряде в жидкости, вызванном пробоем (а) и взрывом проводника (б)

Из-за потерь энергии в соединительных проводах и элементах накопителя, в канале разряда и в газовой полости только незначительная часть накопленной энергии подводится при пробое промежутка или взрыве проволоочки к объекту обработки. Однако при разряде в жидкости достигаются высокие концентрации энергии и скорости обработки, что и определяет области применения электрогидравлических установок. Это прежде всего высокоскоростное деформирование металлов, разрушение и дробление хрупких материалов, очистка металлических деталей от формовочных смесей, окалина, эхолокация водоемов и т.п.

13.2.2. Технологические применения разряда в жидкости

Как уже отмечалось, технологии с применением электрического разряда в жидкости относятся к высокоскоростным. Этим и определяется их преимущество.

Можно назвать ряд технологических процессов, которые либо нашли применение, либо перспективны. Среди них отметим следующие:

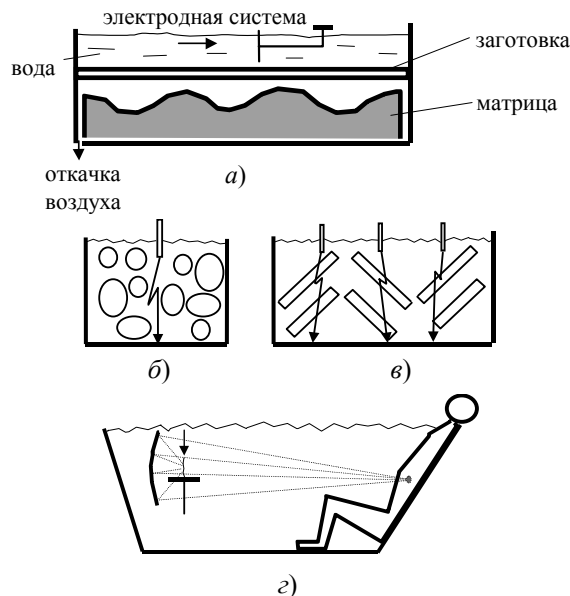


Рис. 13.4. Типичные электрогидравлические технологические процессы:

- а) штамповка; б) дробление хрупких материалов (щебень, гранит и т.д.);
- в) разрушение некондиционных железобетонных изделий;
- г) разрушение камней в почках человека

- *Штамповка деталей из труднодеформируемых материалов или сложной конфигурации.* Штамповка осуществляется в устройстве, схематично показанном на рис. 13.4,а. Листовая заготовка вместе с матрицей помещается в бак с водой. Над заготовкой размещается электродная система. В результате разряда в жидкости механическое воздействие ударной волны и потоков жидкости на заготовку приводит к ее деформации. Перемещаясь при каждом разряде к матрице на некоторое расстояние, в конце обработки заготовка принимает форму матрицы. Для того, чтобы в процессе обработки заготовка плотно прилегала к матрице, образуя изделие, воздух из пространства между заготовкой и матрицей откачивается. Как видно из рисунка, при электрогидравлической штамповке реализуется экономия на оснастке: для приготовления детали требуется только матрица. Пуансон, необходимый при традиционной штамповке отсутствует.

- *Дробление хрупких материалов* (строительных материалов, геологических проб, некондиционного бетона, негабаритов и т.д.) (рис. 13.4,б,в). При этом порция обрабатываемого материала помещается в сосуд, заполняемый водой. В сосуде имеется один (рис. 13.4,б) или несколько (рис. 13.4,в) электродов, с которых развивается разряд на дно камеры или на арматуру разрушаемого железобетона. После серии разрядов бетон разрушается, извлекаются продукты обработки и цикл повторяется.

- *Очистка литья от формовочной земли.* При этом удается проводить очистку в формах сложной формы и существенно улучшить условия труда.

- *Очистка поверхностей от окалины, минеральных отложений и т.д.*

- *Разрушение камней в почках человека без хирургического вмешательства, путем концентрации ударных волн в требуемом месте.* При этом пациент помещается в ванну в водой (рис. 13.4,г). Следящая как правило рентгеновская система обеспечивает излучение разряда в момент, когда разрушаемый камень оказывается в фокусе концентрирующей системы. Раздробленный камень выводится из организма естественным путем.

- *Активизация нефтяных скважин.*

- *Эхолокация водоемов и многие другие.*

13.3. Электроэрозионная обработка материалов

13.3.1. Основные сведения

Под электроэрозионной обработкой понимают обработку металлов с использованием электрической эрозии, возникающей при организации импульсного разряда между обрабатываемой деталью и специальным электродом-инструментом. Электроэрозионная обработка производится с целью придания детали требуемой формы (размерная обработка), упрочнения поверхности или нанесения на нее защитного покрытия.

Принципиальная схема обработки детали на электроэрозионном станке показана на рис.13.5. При обработке используется собственно станок 1 с рабочей ванной 2, в которой находится стол 3 для установки электрода-изделия 4 с перемещением по двум координатам; 5 – регулятор подачи электрода-инструмента; 6 – источник питания – генератор импульсов; 7 – система снабжения рабочей жидкостью, состоящая из насосов, фильтров, бака и т.п.; 8 – электрод-инструмент.

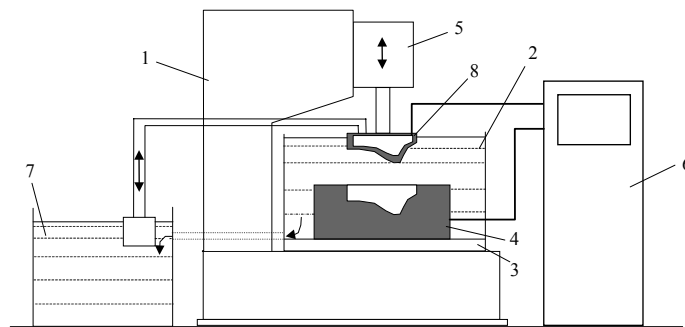


Рис.13.5. Электроэрозионный станок со вспомогательными устройствами энергоснабжения и снабжения рабочей жидкостью

Источник питания 6 преобразует переменный ток промышленной частоты в импульсный с регулируемой частотой следования импульсов от сотен до сотен тысяч герц, амплитудой от долей до тысяч ампер, скважностью от 1,01 до 5÷10, длительностью импульса от долей до нескольких тысяч микросекунд. Изменением указанных параметров устанавливается технологический режим обработки.

Регулятор 5 подачи осуществляет автоматическое изменение положения одного из электродов с целью поддержания заданного межэлектродного зазора, изменяющегося благодаря эрозии материала электродов.

Система снабжения 7 служит для урегулирования расхода и очистки рабочей жидкости, подаваемой с целью облегчения удаления продуктов процесса и охлаждения непосредственно в межэлектродный промежуток (рабочую зону) и в ванну 2 станка.

Различают два вида электроэрозионной обработки: электроискровую и электроимпульсную.

Электроискровая обработка производится короткими импульсами тока (менее 100 мкс). Условно такие разряды называют искровыми, из чего следует и название обработки.

Электроимпульсная обработка характеризуется более длительными импульсами тока (более 100 мкс), при которых разряд по своим характеристикам приближается к дуговому: с характерными зонами и столбом канала, для которого характерны малые градиенты напряжения.

Принцип реализации электроэрозионной обработки основан на тепловом действии канала разряда на обрабатываемую деталь. В канале разряда, включая приэлектродную зону, за короткое время выделяется энергия, нагревая газовую среду канала (в основном пары металла) до температуры в несколько тысяч градусов. За счет теплопроводности из зоны разряда формируется тепловой поток, который быстро нагревает непосредственно примыкающий к месту разряда металл заготовки, плавит и частично испаряет некоторое количество металла, образуя эрозионную лунку. Для организации разряда с нужными параметрами и эвакуации продуктов эрозии (пара и частиц расплавленного металла) разряд производится в технологической жидкости (керосин, масло, вода).

На рис.13.6 показаны открытая (а) и закрытая (б) рабочие зоны электроэрозионного станка.

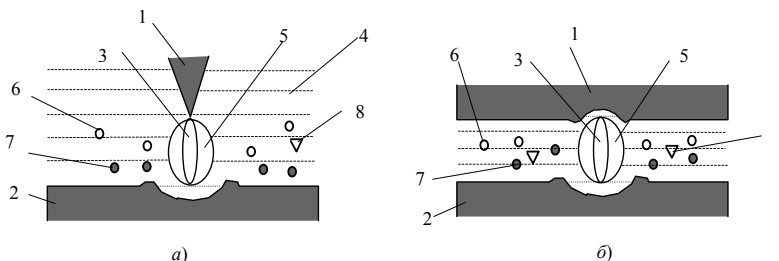


Рис.13.6. Схема открытой (а) и закрытой (б) рабочей зоны при единичном разряде:

1 – анод; 2 – катод; 3 – канал разряда; 4 – рабочая среда; 5 – газовый пузырь;
6 – пузырьки пара или газа; 7 – твердые частицы; 8 – продукты пиролиза

Напряжение источника питания электроэрозионных установок составляет обычно несколько десятков вольт (в некоторых случаях – сотни вольт), поэтому расстояние между обрабатываемой деталью 2 и электродом-инструментом 1 составляет микроны. Электрод-инструмент выполняется подвижным. Разряды возникают в тех местах, где расстояние между электродом и деталью минимально. Образовавшаяся лунка приводит к увеличению расстояния, и разряд при следующем импульсе происходит в другом месте. Таким образом, постепенно обрабатывается вся поверхность между электродом и деталью, электрод 1 медленно вводится в отверстие, образуемое в детали 2. Продукты эрозии 7 (мелкие затвердевшие частицы материала, как детали, так и электрода), продукты пиролиза 8 выносятся жидкостью 4 из отверстия.

Главными преимуществами электроэрозионной обработки являются возможность обработки металлов с любой прочностью, включая высокопрочные сплавы, а также возможность изготовления отверстий, линий разреза сложной конфигурации. Например, используя электрод в форме спирали, возможно изготовить отверстие повторяющее форму электрода в заготовке, обладающей любой прочностью. Никакими другими технологическими приемами аналогичную операцию выполнить невозможно.

Важной особенностью электроэрозионной обработки является простота регулирования выделяемой в разряде энергии путем изменения емкости источника питания. Тем самым обеспечивается желаемый режим: грубый (обдирочный) или более мягкий, с более гладкой поверхностью обрабатываемой детали (финишные режимы).

Электроэрозионная обработка как технологический процесс впервые была изобретена в СССР в 1943 г. Изобретателями этого вида обработки являются Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Приоритет СССР был признан в 1946 г. во Франции, Англии, США, Швеции, Швейцарии, что последовало после постановления Совнаркома СССР в 1945 г. о патентовании за рубежом этого изобретения (были такие порядки!).

В течение десятилетий ведущие организации СССР (АН Молдовы, Кишинев; ЭНИМС, Москва и др.) занимали передовые позиции, как в области разработки технологии, изучении процессов, так и по производству серийного оборудования, электроэрозионных станков, машин. В основном для отражения проблем электроэрозионной обработки был основан издающийся в Кишиневе академический журнал “Электронная обработка материалов”.

В настоящее время электроэрозионная технология широко распространена. Без электроэрозионных станков невозможно современное производство многих приборов, инструмента, изделий из твердых сплавов, фильер, матриц, пуансонов и многого другого.

13.3.2. Физические основы электроэрозионной обработки металлов

Не вдаваясь в подробности электрического пробоя коротких промежутков в жидкости и динамики перехода к искровой или дуговой формам разряда, можно представить следующую картину разряда (рис.13.7).

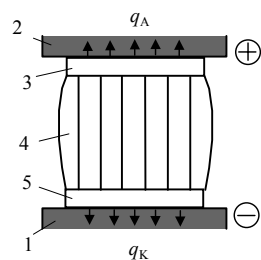


Рис.13.7. Разряд между электродами 1 и 2

Между катодом 1 и анодом 2 в течение некоторого времени, равного длительности импульса тока существует канал разряда. При этом в нем выделяются зоны прианодного 3 и прикатодного 5 падений напряжений, а также пламенный столб 4.

В прикатодной области протяженностью порядка 10^{-5} – 10^{-4} см создается высокая напряженность электрического поля, достаточная для термоавтоэлектронной эмиссии из катода. Она равна $\sim 10^6$ В/см. В прикатодной области электроны на 2–3 длинах свободного пробега должны набрать энергию, достаточную для ударной ионизации молекул газа (пара) на границе плазменного столба, где необходимая концентрация носителей заряда для обеспечения тока поддерживается термической ионизацией.

В прикатодной области ток в основном сосредоточен в катодных пятнах (ток на одно пятно 1–5 А), беспорядочнодвигающихся по опорной зоне на катоде. Поперечные размеры опорной зоны зависят от тока: при большом токе опорная зона разряда велика, с уменьшением тока она сужается.

На поверхность катода воздействует поток положительных ионов, излучение. Поступает энергия и за счет теплопроводности из канала разряда. Прикатодное падение напряжения U_k зависит от материала катода, и для большинства металлов оно составляет 15–20 В. Примерно половина мощности, равной $U_k i$, всеми механизмами передачи энергии (бомбардировка ионами, теплопроводностью и т.д.), поступает в виде теплового потока q_k на поверхность катода в опорной зоне канала разряда q_a .

Прианодная область также состоит из анодных пятен. В ней падение напряжения составляет 3–5 В. Анод подвергается бомбардировке электронами и отрицательными ионами, а также воздействию теплового потока.

Сопоставляя тепловые потоки на анод и катод, можно отметить, что при коротких импульсах поток на катод выше, и эрозия катода более существенна, чем анода. Поэтому электроискровая обработка обычно проводится при отрицательной полярности обрабатываемой детали. При больших длительностях соотношение обратное, и при электроимпульсной обработке деталь имеет, как правило, положительную полярность.

Тепловая мощность, подводимая к электродам из канала, составляет 10^3 – 10^4 Вт, что при малых размерах опорной зоны дает плотность теплового потока 10^9 – 10^{10} Вт/м².

При воздействии такого мощного теплового потока тепловые процессы на электроде следующие (рис.13.8).

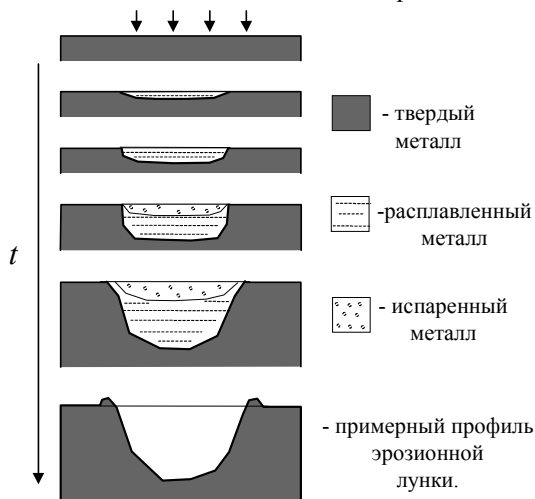


Рис.13.8. Развитие тепловых процессов во времени при электроэрозионной обработке материалов

Энергия, поступающая в электрод, нагревает материал. Поскольку тепловые процессы инерционны, то за счет теплопроводности сравнительно медленно повышается температура на некоторой глубине от поверхности материала.

Если проследить во времени динамику повышения температуры по глубине электрода, то можно установить следующие закономерности.

В начале процесса нагревается по мере поступления энергии поверхностный тонкий слой. Температура его повышается, достигая температуры плавления; начинается фазовый переход, требующий сравнительно большей энергии. Граница между твердым и жидким металлом удаляется от поверхности электрода.

Так как тепло поступает с поверхности и к границе плавления транслируется через жидкий металл, то жидкий металл нагревается вплоть до температуры испарения. С поверхности жидкого металла начинается испарение, и верхняя граница жидкого металла также смещается вглубь электрода.

Следует отметить, что такая картина тепловых процессов довольно условна, она близка к наблюдаемым при сравнительно медленных процессах (при электроимпульсной обработке). При быстрых процессах наблюдаются перегревы как твердой, так и жидкой фаз. Чем короче процесс, тем большая роль испарения в эрозии материала.

После окончания импульса тока (прекращения действия теплового потока) процесс продвижения границ плавления и испарения может некоторое время продолжаться за счет тепловой энергии, содержащейся в жидкой фазе, которая может иметь температуру, большую температуры плавления (а поверхностные слои – большую, чем температура кипения).

Как уже отмечалось, электроэрозионная обработка проводится в жидкой среде. Возникновение канала разряда и его существование вызывает разложение и испарение среды, сопровождающееся механическими эффектами, в частности, движением массы жидкости, окружающей возникший газовый пузырь.

Обычно газовый пузырь, образованный при разряде, совершает пульсирующие движения, пока полностью не захлопнется.

Потоки жидкости, а также взрывное расширение нагретого материала приводит к тому, что большая часть расплавленного металла выбрасывается в окружающую жидкость в виде мелких по форме близких к сферическим частицам. Естественно, часть расплавленного металла кристаллизуется. В результате на электроде образуется лунка с валовидным наростом по краям за счет кристаллизации и с плоским дном. На дне имеется некоторый слой перекристаллизованного материала, который по своей структуре отличается от исходного материала. На этом эффекте основан такой вид электроэрозионной обработки, как упрочнение поверхности.

13.4. Магнитно-импульсная обработка материалов

13.4.1. Основные сведения

Магнитно-импульсная обработка материалов основана на использовании электродинамических сил, которые в импульсных режимах могут достигать гигантских значений. Если давления, создаваемые электродинамическими силами, превышают предел прочности, то происходит деформация заготовки. Этот процесс часто называют магнитной штамповкой.

При магнитно-импульсной обработке происходит преобразование электрической энергии, накопленной в конденсаторной батарее, при разряде на индуктор или непосредственно на заготовку в энергию импульсного магнитного поля, совершающего работу деформирования электропроводной заготовки.

Известно, что на единицу длины проводника с током I , помещенном в магнитное поле с напряженностью H , действует сила

$$F = \mu\mu_0 [I \times H], \quad (13.1)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость окружающей среды.

Магнитное поле, действующее на проводник с током, может быть создано током, протекающим в другом проводнике. Величина напряженности магнитного поля в пространстве вокруг проводника с током может быть определена из закона полного тока

$$\int_l H dl = \sum I, \quad (13.2)$$

где l – контур интегрирования.

На расстоянии r от уединенного проводника

$$H = I / 2\pi r, \quad (13.3)$$

В случае бесконечно тонких прямых проводников, расположенных на расстоянии Δ_r друг от друга, электродинамическая сила, действующая на единицу длины проводников,

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi \Delta_r}. \quad (13.4)$$

Направление силы зависит от направления токов I_1 и I_2 в проводниках: при одинаково направленных токах проводники притягиваются друг к другу, при противоположно направленных – отталкиваются.

Для двух бесконечно тонких шин шириной a , расположенных на небольшом расстоянии ($\Delta_r \ll a$) друг от друга, напряженность магнитного поля в объеме между шинами без учета краевых эффектов равна

$$H = I/a. \quad (13.5)$$

Давление магнитного поля на шины численно равно удельной плотности энергии поля

$$p = \mu\mu_0 \frac{H^2}{2}. \quad (13.6)$$

Если толщина шин имеет конечную величину, то из-за эффекта близости и поверхностного эффекта ток по сечению шин распределяется неравномерно.

Поэтому при расчете распределения силы или давления по толщине обрабатываемой заготовки и для определения индуктивности системы следует использовать не геометрическое расстояние Δ_r , а некоторое эквивалентное расстояние

$$\Delta_{\text{эkv}} = \Delta_r + 2\Delta, \quad (13.7)$$

где $\Delta = \sqrt{2\rho/(\mu\mu_0\omega)}$ – глубина проникновения электромагнитного поля в материал шин; ρ – удельное электрическое сопротивление материала шин; ω – круговая частота тока.

Известно, что в проводящем теле, расположенном вблизи проводника с переменным током, возникают вихревые токи. Взаимодействие тока в проводнике с наведенным в теле (заготовке) током сопровождается появлением отталкивающей силы

$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}, \quad (13.8)$$

где dL/dx – изменение индуктивности системы проводник-заготовка в направлении x , перпендикулярном поверхности проводника.

Среднее давление на проводник и заготовку равно силе F , деленной на площадь проводника S .

Величина давления на заготовку толщиной δ может быть определена по формуле (13.6), если электромагнитное поле не проникает сквозь заготовку ($\Delta \ll \delta$). В случае проникновения поля ($\Delta \approx \delta$) давление определяется разностью удельных плотностей энергии на поверхностях заготовки.

$$p = \mu\mu_0 \frac{H_1^2 - H_2^2}{2}. \quad (13.9)$$

13.5. Разновидности магнитно-импульсной обработки

На рис.13.9 приведены наиболее типичные схемы разрядных контуров установок для магнитно-импульсной обработки материалов.

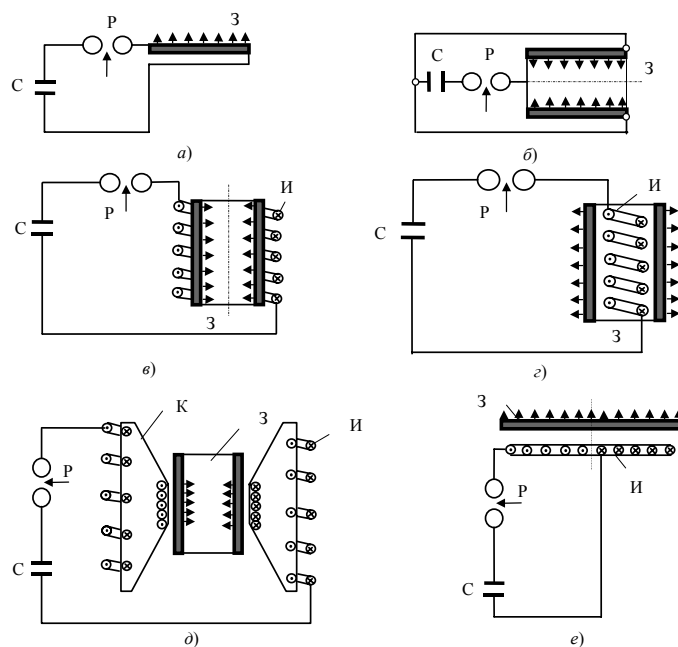


Рис. 13.9. Разновидности магнитно-импульсной обработки

Наиболее простые из них – первые две, в которых обрабатываемая заготовка 3 включается последовательно в цепь разряда, состоящую из заряженного конденсатора C и разрядника P . В установке, схема которой показана на рис.13.9,а электродинамические силы создаются за счет взаимодействия тока в 3 с магнитным полем, созданным током в обратном проводе, проложенном в непосредственной близости от 3. Заготовка или отдельные ее участки движутся в направлении действия электродинамических сил, показанных стрелками. В зависимости от задачи обработки за 3 размещается матрица той или иной формы. Аналогично осуществляются и другие операции магнитно-импульсной

обработки. В этом случае вместо 3 включается подвижная мембрана, передающая импульсное давление на предмет обработки или в упругую среду.

Операции обжима заготовок из проводящего материала (формообразование, сборка, прессование материалов внутри заготовки и т.д.) наиболее просто осуществляются на установках, схема которых соответствует показанной на рис.13.9,б. Обратный токопровод выполняется обычно в виде трубки и вместе с 3 образует коаксиальную малоиндуктивную систему. Основным недостатком этого способа обработки являются трудности получения требуемых больших разрядных токов, что связано со сложностями конструктивного выполнения источника тока, и обеспечения контакта токопроводящих проводников с заготовкой.

В установках с индукторами И (рис.13.9,в) в значительной степени облегчается решение этих проблем. Так, многovitковый индуктор И вместе с 3 образует понижающий трансформатор, и суммарный ток, протекающий по 3, может во много раз превышать ток первичной цепи.

С помощью индукторов И осуществляются операции обжима и раздачи (формообразование, сборка, вырубка отверстий, сварка и т.д.) в соответствии со схемами рис.13.9,в-е (последняя служит для обработки плоских заготовок). При обработке заготовок с малыми размерами используются концентраторы К магнитного потока (рис.13.9,д), представляющие собой массивные детали сложной формы из хорошо проводящего и механически прочного материала. Концентратор имеет не показанную на рис.13.9,д узкую аксиальную щель и представляет собой незамкнутый виток. Вместе с многovitковым намотанным на него индуктором концентратор образует понижающий трансформатор, а вместе с заготовкой – трансформатор с коэффициентом трансформации, близким к единице. Металл стенок щели концентратора выполняет функции проводов, соединяющих оба трансформатора.

Электрические схемы замещения разрядных установок, используемые для расчетов переходных процессов, приведены на рис. 13.10.

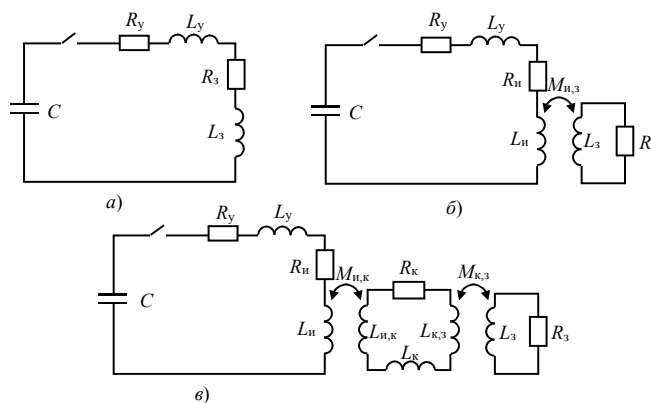


Рис. 13.10. Схемы замещения разрядных цепей установок с пропусканием тока через заготовку (а) с индуктором (б) и концентратором (в)

В них входят внутренние индуктивность и активное сопротивление установок L_y и R_y , индуктивности и активные сопротивления заготовок L_3 и R_3 . При использовании индукторов необходимо учитывать их индуктивности L_n и активные сопротивления R_n , а также взаимную индуктивность $M_{n,3}$ (рис.13.10,б). Наиболее сложной является схема замещения разрядной цепи с концентратором (рис.13.10,в). В нее кроме упомянутых элементов входят взаимные индуктивности индуктор-концентратор $M_{n,k}$ и концентратор-заготовка $M_{k,3}$, а также активное сопротивление концентратора R_k , индуктивности участков концентратора, граничащих с обмоткой $L_{n,k}$, с заготовкой $L_{k,3}$ и в щели L_k .

Все эти схемы приводятся к одной, состоящей из последовательно соединенных конденсатора C , заряженного до напряжения U , суммарных индуктивности L и активного сопротивления R .

Разрядный ток в магнитно-импульсных установках имеет колебательный характер. Нелинейности элементов R и L обычно слабо сказываются на форме тока, поэтому он может быть найден из решения переходного процесса для линейной цепи:

$$i = \frac{U}{\omega L \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}} e^{-Rt/2L} \sin(\omega t \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}),$$

где $\omega = 1/\sqrt{LC}$.

Электродинамические силы в простейших случаях (например, для установок, показанных на рис.13.10,а,б и имеющих схему замещения, приведенную на рис.13.10,а) находятся по уравнению

$$F = \frac{U^2 C}{2L(1 - \frac{R^2 C}{4L})} e^{-Rt/L} \sin^2(\omega t \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}}) \frac{\partial L}{\partial x}.$$

Аналогично можно рассчитать электродинамические силы, действующие на заготовку, при использовании индукторов или концентраторов. Для этого необходимо определить ток в заготовке, что нетрудно сделать при заданном токе разряда i и известных параметрах схем рис.13.10,б,в.

13.5.3. Генераторы токов для магнитно-импульсной обработки

Генераторами импульсных токов в магнитно-импульсных установках являются малоиндуктивные емкостные накопители энергии. Зарядное напряжение накопителей обычно составляет 5÷20 кВ.

Накопители комплектуются из импульсных конденсаторов. В установках с большой накапливаемой энергией конденсаторы объединяются в блоки, имеющие собственные коммутаторы разрядного тока. Блочный принцип построения накопителя позволяет достичь малых значений индуктивности и активного сопротивления разрядной цепи L_y и R_y , избежать опасности взрыва конденсаторов в случае их повреждения в процессе зарядки. Внутренняя индуктивность разрядной цепи установки может быть сведена до 10^{-8} Гн.

В установках используют импульсные конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией с пропиткой конденсаторным либо касторовым маслом или соволом. При небольшом числе параллельно соединенных конденсаторов для достижения высокой частоты разрядного тока выбирают конденсаторы с малой внутренней индуктивностью.

Конденсаторы в установке или в пределах блока объединяются параллельно малоиндуктивной ошиновкой. Применяют два типа ошиновки: кабельную и плоскую, выполняемую широкими шинами, накладываемыми непосредственно на выводы конденсаторов.

В качестве коммутаторов разрядного тока используют воздушные или вакуумные разрядники и игнитроны. В простейших установках применяют механические коммутаторы – двухэлектродные разрядники, срабатывающие при сближении электродов. Если требуется точно синхронизировать разряд с работой остального, например, измерительного оборудования или обеспечить одновременную работу отдельных разрядников, используют управляемые разрядники – тригatronны или игнитроны.

Накопитель заряжается от источника высокого постоянного напряжения, включающего в себя повышающий трансформатор, выпрямитель, защитные резисторы и устройства для регулирования зарядного напряжения и его измерения. Необходимым элементом установки является заземляющее устройство, разряжающее конденсаторы через резистор с малым сопротивлением и закорачивающее выводы конденсаторов после окончания работы. Зарядное устройство и накопитель энергии размещаются, как правило, в металлическом заземленном корпусе, дверцы которого снабжаются блокировкой.

Разрядный контур соединяется с заземленным корпусом установки в одной точке – обычно в месте присоединения индуктора.

Ответственным элементом установки является индуктор или концентратор. Он рассчитывается и изготавливается для каждого типа заготовки или технологической операции и заменяется при переходе на обработку другой детали. Индуктор при разрядах подвергается воздействию таких же электродинамических сил, что и заготовка. Кроме того, его изоляция испытывает электрические нагрузки. Поэтому обеспечение термической, механической и электрической стойкости индуктора является сложной технической задачей.

13.5.4. Технологические особенности

При магнитно-импульсной обработке достигаются скорости перемещения заготовки до нескольких сотен метров в секунду, что открывает широкие технологические возможности этого способа при штамповке труднообрабатываемых обычными способами материалов, импульсной сварке и т.д.

Отсутствие инерционной среды, через которую обычно передается давление на обрабатываемую деталь, а также распределение электродинамических сил по объему заготовки, возможность осуществления технологических операций в контролируемой газовой среде или в вакууме через изоляционные стенки – уникальные особенности магнитно-импульсной обработки.

К преимуществам магнитной штамповки относятся также возможность точного регулирования электродинамических сил путем изменения электрических параметров установки, простота технологической оснастки, возможность полной автоматизации изготовления деталей и т.д.

Список литературы

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов / Бортник И.М., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н. и др.; Под ред. Верещагина И.П., Ларионова В.П. —М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543с.
2. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. —М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электрическом поле / Верещагин И.П., Котлярский Л.Б., Морозов В.С. и др. —М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Дымовые электрочистильники / Левитов В.И., Ремизов И.К., Верещагин И.П. и др.: Под общ. ред. Левитова В.И. —М.: Энергия, 1980.
5. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабикян Г.З. и др. —М.: Энергия, 1974.
6. Физические основы электрической сепарации / Ангелов А.И., Верещагин И.П., Ершов В.С. и др.; Под ред. Ревнивцева В.И. —М.: Недра, 1983.
7. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Харьков, Вища школа, 1977.
8. Электротехнический справочник, раздел 54, Т.3, кн.2 —М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. Из-во АН СССР, —М.: 1958.
10. Лившиц П.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. —М.: Энергоатомиздат, 1983.

Аношин Олег Анатольевич
Белогловский Андрей Анатольевич
Верещагин Игорь Петрович
Калинин Алексей Владимирович
Кривов Сергей Анатольевич
Кужекин Иван Прохорович
Орлов Александр Васильевич
Панюшкин Владимир Валерьевич
Соколова Марина Владимировна
Темников Александр Георгиевич

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие по курсу
«Основы электротехнологии»

УДК
УДК 621.319.7.001.

Утверждено учебным управлением МЭИ

Рекомендовано Минобразования РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов электроэнергетических и электротехнических специальностей

Подготовлено на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений

Аношин О.А., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Калинин А.В., Кривов С.А., Кужекин И.П., Орлов А.В., Панюшкин В.В., Соколова М.В., Темников А.Г.

Компьютерная верстка Орлова А.Л.

Высоковольтные электротехнологии. – М.: из-во МЭИ, 1999. – 204 с.

Содержит основные сведения по технологическим процессам, основанным на использовании сильных электрических и магнитных полей в сочетании с использованием заряженных аэрозолей.

Предназначено для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей.