

*Горбенко Ю.М.,
канд. техн. наук, доцент,
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
Россия, г. Владивосток*

*Кирюха В.В.,
доцент,
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
Россия, г. Владивосток*

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕДАХ

***Аннотация:** В работе проведен исторический обзор развития теории газового разряда. Отмечено применение коронного разряда для создания электрофильтров, как наиболее эффективных средств очищения воздушной среды. Кратко рассмотрена физика принципа действия электрофильтра.*

***Ключевые слова:** газовый разряд, коронный разряд, электрофильтр, теория газового разряда, исторические этапы.*

***Annotation:** The paper provides a historical overview of the development of the theory of gas discharge. The use of corona discharge to create electrostatic precipitators as the most effective means of purifying the air environment is noted. The physics of the principle of operation of an electrofilter is briefly considered.*

***Key words:** gas discharge, corona discharge, electrofilter, theory of gas discharge, historical stages.*

Электрофильтры являются наиболее эффективными пылеулавливающими устройствами. Эксплуатационные затраты на их использование по сравнению с другими газоочистительными аппаратами существенно ниже. В основу действия электрофильтра положен коронный разряд, в поле которого происходит зарядка взвешенных в очищаемом воздухе частиц и их осаждение на осадительных электродах под действием электрических сил.

Как известно коронный разряд возникает при сравнительно больших давлениях во всех тех случаях, когда поле в разрядном промежутке очень неравномерно из-за малого радиуса кривизны поверхности одного или обоих электродов. При коронном разряде происходит неполный пробой газового разрядного промежутка, завершающийся при последующем искровом пробое.

Коронный разряд представляет собой форму незавершенного электрического разряда, характерного для систем электродов с резко неоднородным полем. Ионизационные процессы при коронном разряде сосредоточены в узкой области, где напряженность поля наибольшая. Данная область называется “чехлом или оболочкой” короны. Во внешней области коронного разряда ионизационные процессы отсутствуют, так как напряженность поля здесь для ионизации недостаточна. В данной области присутствуют отрицательные либо положительные, в зависимости от полярности короны, ионы, которые создают в межэлектродном пространстве униполярный объемный заряд. Если во внешней области коронного разряда, занимающей преобладающую часть межэлектродного пространства, находятся твердые или жидкие частицы, то ионы из объемного заряда, осаждаясь на поверхности этих частиц, сообщают им избыточный электрический заряд, т. е. происходит зарядка частиц. Далее под действием сил электрического поля заряженные частицы движутся в направлении,

перпендикулярном потоку, и осаждаются на осадительных электродах (рис. 1).

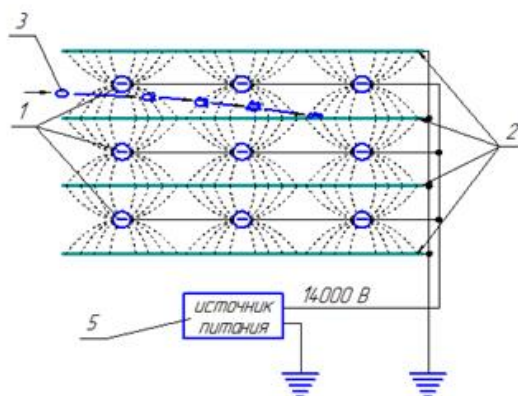


Рисунок 1. Принцип действия электрофилтра

1- Коронирующие электроды, 2 - заземленные осадительные электроды, 3 – осаждаемая частица, 4 – потенциальные плоские электроды в зоне зарядки, 5 – источник питания электрофилтра

В процессе ионизации воздуха с помощью коронного разряда, в «чехле» короны происходит нарушение внутримолекулярных связей в газовых составляющих воздуха (кислород, азот и др.) с дальнейшим образованием озона, окислов азота и др. Таким образом, воздух, очищаемый в электрофилтре, насыщается озоном, окислами азота и др. Это еще одно из преимуществ использования электрофилтров, так как озон уничтожает все известные микроорганизмы: вирусы, бактерии, грибки, водоросли, их споры, цисты простейших и т. д.

При рассмотрении теории газового разряда следует рассмотреть вольт-амперную характеристику (рис. 2) в координатах плотности тока j и напряженности электрического поля E [1], если к газообразному диэлектрику приложить возрастающее напряжение и измерить протекающий через него ток.

Как видно из рис. 2, в данной зависимости можно выделить четыре области. Здесь область «а» относится к закону Ома, область «в» – к насыщению тока. Обе области составляют область слабых полей.

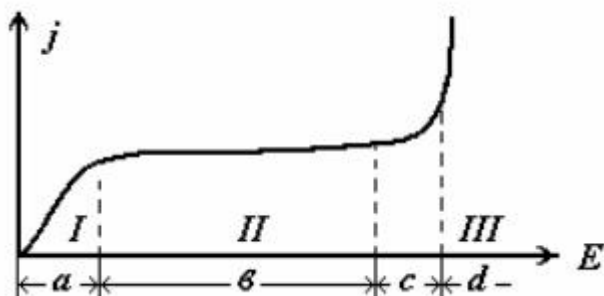


Рисунок 2. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля

В области «с» наблюдается резкое возрастание плотности тока за счет развития ионизационных процессов в газе, т.е. это область ударной ионизации. Область «d» – область скачкообразного возрастания плотности тока. Здесь происходит пробой межэлектродного промежутка, который характеризуется сильным возрастанием плотности тока. Если плотность тока насыщения составляет $10\text{--}18 \text{ А/см}^2$, то при пробое плотность тока в газовом промежутке может составлять десятки и сотни А/см^2 в зависимости от мощности источника питания и параметров разрядной цепи.

Первым явлением электрического разряда в газах, воспроизведенным в лаборатории, было извлечение электрических искр из наэлектризованных тел. В 1700 году доктор Валь наблюдал извлечение искры из наэлектризованного янтаря и описал это явление.

В 1746 году Мушенбрек построил первые лейденские банки. Изучение зарядки этих банок и разрядки их при помощи электрической искры привело к самому названию: «электрический разряд через воздух».

Питер ван Мушенбрук (1692 – 1761), нидерландский физик, внесший значительный вклад в разработку методов экспериментальной физики. Опыты с электричеством привели Мушенбрука к созданию так называемой лейденской банки (1745; независимо от немецкого физика Э. Г. Клейста).

Питер ван Мушенбрук впервые ввел в обиход понятие «электрическая рыба», сравнивая удар электрическим зарядом во время случайного открытия конденсатора с физическими особенностями электрических скатов.

Не смотря на свои глубокие научные познания в области электричества Мушенбрук очень долго считал, что молния не имеет электрической природы. Лишь после уникальных опытов Бенджамина Франклина он изменил свою точку зрения.

Эвальд Юрген фон Клейст (1700 - 1748) — немецкий юрист, лютеранский клирик (чтец), физик. 11 октября 1745 года Клейст самостоятельно изобрёл «медицинскую банку», которая может хранить электрический заряд в больших количествах. В конце 1745 года он сообщил о своем открытии группе немецких учёных, и эта новость была передана в Лейденский университет, где была тщательно исследована. Изобретение стало более известно как «лейденская банка» благодаря труду Питера ван Мушенбрука.

Из других видов разряда Гауксби также в XVIII веке наблюдал свечение разреженного воздуха внутри шара, электризуемого снаружи трением.

Фрэнсис Гауксби (Хоксби) (1666 - 1713) — английский физик-экспериментатор и конструктор научных инструментов, член Лондонского королевского общества (1705). До 1704 года проводил опыты в своей мастерской, в дальнейшем — в Королевском обществе. Изучал распространение звука в воздухе и других средах, атмосферную рефракцию, электрические явления, электролюминесценцию, капиллярность, создал ряд физических приборов.

В 1706 году сконструировал первую стеклянную электрическую машину, усовершенствовал воздушный насос (1709). Один из наиболее ранних исследователей электрических разрядов, в 1710 году открыл свечение воздуха в стеклянной трубке при электрическом разряде. Обнаружил «электрический ветер».

В 1752 году Франклин и почти одновременно с ним основоположник всей русской физики Михаил Васильевич Ломоносов показали на опыте, что гром и молния представляют собой мощные электрические разряды в воздухе.

Бенджамин Франклин (1706 -1790) - американский политический деятель, дипломат, изобретатель, учёный, философ, писатель. Одна из самых влиятельных фигур XVIII века.

Научные достижения Б. Франклина:

- Ввёл общепринятое теперь обозначение электрически заряженных состояний «+» и «-»;
- установил тождество атмосферного и получаемого с помощью трения электричества и привёл доказательство электрической природы молнии;
- установил, что металлические острия, соединённые с землёй, снимают электрические заряды с заряженных тел даже без соприкосновения с ними, и предложил в 1752 году проект молниеотвода;
- изобрёл бифокальные очки (1784);
- получил патент на конструкцию кресла-качалки;
- в 1742 году изобрёл эффективную экономичную малогабаритную печь для отопления домов, получившую название печь Франклина (или «пенсильванский камин»), а в 1770 году принципиально её усовершенствовал и специально не стал её патентовать для блага всех сограждан;

- выдвинул идею электрического двигателя и продемонстрировал «электрическое колесо», вращающееся под действием электростатических сил;
- впервые применил электрическую искру для взрыва пороха;
- объяснил принцип действия Лейденской банки, установив, что главную роль в ней играет диэлектрик, разделяющий проводящие обкладки;
- принципиально усовершенствовал стеклянную гармонику, для которой стали сочинять Моцарт, Бетховен, Доницетти, Р. Штраус, Глинка и Чайковский;
- разработал собственную систему управления временем;
- собрал обширные данные о штормовых ветрах (норд-остах) и предложил теорию, объяснявшую их происхождение;
- при участии Бенджамина Франклина были проведены измерения скорости, ширины и глубины Гольфстрима, и это течение, название которому дал Бенджамин Франклин, было нанесено на карту (1770).

Ломоносов (1711 – 1765) установил, что электрические заряды имеются в воздухе и при отсутствии видимой грозы, так как и в этом случае из его «громовой машины» иногда можно было извлекать искры. Громовая машина представляла собой установленную в жилом помещении лейденскую банку, одна из обкладок которой была соединена проводом с металлической гребенкой или острием, расположенными на высоком поставленном во дворе шесте. В 1753 году во время опытов был убит у себя дома молнией, ударившей в шест машины, друг Ломоносова профессор Рихман (1711 – 1753), также производивший исследования при помощи собственной громовой машины. Ломоносов исследовал также свечение разреженного воздуха под действием электрической машины с трением. В 1785 году Кулон (1736 – 1806) во время опытов, приведших к установлению закона Кулона, обнаружил утечку электрических зарядов через воздух (тихий разряд).

В 1802 году профессор физики Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров (1761–1834), впоследствии академик Петербургской Академии наук, впервые, на несколько лет раньше английского физика Дэви (1777 – 1829), обнаружил и затем описал явление так называемой вольтовой дуги в воздухе между двумя угольными электродами.

Из русских электриков XIX века над практическими приложениями вольтовой дуги для освещения весьма успешно работали Павел Николаевич Яблочков (1847–1894) и Владимир Николаевич Чиколев (1845–1898), а приложениями той же дуги для сварки, спайки и плавки металлов – Николай Гаврилович Славянов (1854 - 1897) и Николай Николаевич Бенардос (1842 - 1905). Исследованием вольтовой дуги занимались Дмитрий Александрович Лачинов (1842 - 1902), совместно с В.Н.Чиколевым (1845 - 1898) и В.Ф.Миткевичем (1872 - 1951). В 1905 году В.Ф. Миткевич установил природу процессов на катоде дугового разряда. Несамостоятельным разрядом в воздухе занимался Александр Григорьевич Столетов (1839 - 1896), во время его классического исследования актино-электрического эффекта (фотоэффекта). Ему принадлежит открытие «эффекта Столетова», а также установление первого закона фотоэффекта и ряда других основных черт этого элементарного процесса.

Ивану Ивановичу Боргману (1849 - 1914) принадлежит интересное исследование пути тихого электрического разряда в воздухе при помощи наблюдения положений очень маленькой магнитной стрелки при отсутствии и при наличии разряда через воздух. Владимир Константинович Лебединский (1868 - 1937) изучал в период 1900–1909 гг. отчасти совместно с В. Ф. Миткевичем явления электрической искры, в частности «зажигание» и «тушение» искры ультрафиолетовым светом и радиоактивными излучениями.

Современные теории газового разряда, основанные на представлении об ионизации газа, ведут свое начало от классических работ Дж. Дж. Томсона (1856 - 1940), предпринятых им с середины восьмидесятых годов XIX века, и начертанной им в 1900 году картины разряда, и от работ его ученика Таунсенда (1868—1957). Теория Таунсенда была существенно дополнена в 1931–1932 гг. Роговским (1881 - 1947) путем учета искажения поля в разряде пространственными зарядами. Это дало возможность более полно нарисовать картину перехода разряда из несамостоятельного в самостоятельный и распространить теорию также и на самостоятельный тлеющий разряд.

Явление электрического разряда в газах объясняется несколькими теориями разряда.

Согласно классической теории Таунсенда (первая теория газового разряда), общую картину возникновения электрического разряда в газе можно представить следующим образом. Вследствие естественной радиоактивности и космического излучения в воздухе непрерывно образуются свободные заряды. Так как одновременно с ионизацией происходит процесс взаимной нейтрализации положительных и отрицательных ионов (рекомбинация заряженных частиц), то в результате устанавливается динамическое равновесие (постоянная концентрация ионов обоих знаков, приблизительно равная 1000 пар ионов в 1 см).

Вначале он предположил, что электроны, вышедшие из катода, ускоряются электрическим полем и, достигнув необходимой энергии, производят ионизацию атомов и молекул газа. Далее, по первому мнению Таунсенда, образовавшиеся в результате ударной ионизации положительные ионы движутся к катоду и тоже производят ударную ионизацию.

Эта теория применима к тем типам электрических разрядов в газах или к тем областям газоразрядного промежутка, в которых направленное движение электронов под действием электрического поля преобладает над их беспорядочным тепловым движением. Таунсенд ввёл три коэффициента,

характеризующих процессы ионизации газа. Первый коэффициент объемной ионизации газа электронами α – обозначает число свободных электронов и равное ему число положительных ионов, образуемых одним электроном путём соударения с частицами газа при продвижении этого электрона на 1 см в направлении от катода к аноду.

В первоначальной теории Таунсенд не задавался вопросом о природе отрицательно заряженных частиц, одинаково применяя к ним понятие ион независимо от того, будет ли это на самом деле отрицательный ион или электрон. Он считал, что любые ионы вообще при соударениях с частицами газа ионизуют их. Поэтому наравне с коэффициентом α , который Таунсенд относил к отрицательно заряженным частицам вообще, он ввёл второй коэффициент ионизации положительными ионами β , равный числу ионизаций, производимых одним положительным ионом при продвижении от анода к катоду на 1 см.

Однако вскоре экспериментально было показано, что положительные ионы не способны производить ударную ионизацию в слабоионизованной плазме из-за их малой подвижности. Поэтому Таунсенд был вынужден отказаться от указанного механизма. Взамен этого он предположил, что положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и выбивают электроны, которые, в свою очередь, ускоряясь в электрическом поле, также производят ударную ионизацию.

Третий коэффициент γ , характеризует именно поверхностную ионизацию на катоде и показывает, сколько электронов, выделяющихся из катода, приходится в среднем на каждый положительный ион, попадающий на катод.

Совокупность процессов, вызывающих выход электронов из катода под действием элементарных процессов, имеющих место на поверхности катода при наличии разряда, называют γ процессами.

Для определения коэффициента α требуется решение кинетического уравнения, что сопряжено с определенными трудностями. Таунсенд в свое время предложил упрощенный вывод уравнения для определения коэффициента α . Для этого он сделал три небезупречных предположения:

1. Электрон ионизует только тогда, когда его энергия равна или больше $W_e \geq W_{и}$.

2. После ионизации электрон полностью теряет свою кинетическую энергию.

3. Электрон набирает энергию для ионизации $W_{и}$ на пути $X_{и}$.

Отсюда энергия электрона $W_e = q \cdot E \cdot X_{и}$.

Тогда

$$X_{и} = W_{и} = U_{и}/q \cdot E ,$$

где $U_{и}$ называется потенциалом ионизации.

По Таунсенду коэффициент определяется выражением

$$\alpha = A \cdot P \cdot e^{-\frac{BP}{E}},$$

где A и B – постоянные газа, значения которых приведены в таблице, P – давление газа.

Полученная зависимость $\alpha / P = f(E / P)$ представлена на рис. 3.

Вторая теория – теория газоразрядной плазмы – с 1924 г. разрабатывалась Ирвинг Ленгрюмом (1881 - 1957) — и его школой, но, по мнению Н.А.Капцова, к объяснению физики коронного разряда не имеет прямого отношения.

Таблица 1.

Характеристики газообразных сред (постоянные A, B газа)

Газ	A ,		B ,		E/P ,	
	в/см	мм	В/см	мм	В/см	мм
	рт.ст.		рт.ст.		рт.ст.	
Воздух	14,6		366		150÷160	
Аргон	13,6		235		100÷600	
Углекислота	20		466		500÷1000	
Водород	5,0		130		150÷400	
Гелий	2,8		34		20÷150	

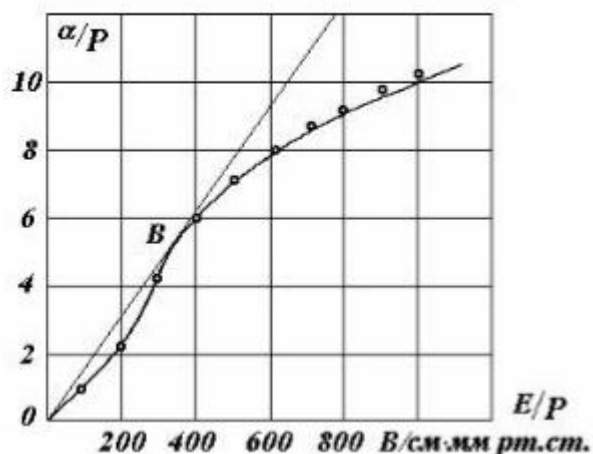


Рисунок 3. Зависимость $\alpha/P = f(P)$ для воздуха при атмосферном давлении

Третья теория – теория изотермической плазмы – разрабатывалась в довоенные годы Эленбасом и другими голландскими физиками.

Использованные источники:

1. Капцов, Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. — 2-е изд.. — Москва, Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. — 836 с., 1 л. ил. ил.; 23.

2. Райзер Ю.П., Физика газового разряда — 3-е изд. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. — 736 с.

3. Грановский В. Л., Электрический ток в газе, т. 2 — Москва, 1971 — 543 с.

4. Техническая библиотека [Электронный ресурс]
https://techlibrary.ru/b2/2o1e1a1o1p1c_2j.2u._2x1r1p1x1f1s1s2c_1q1f1r1f1o1p1s1a_1c_1n1o1p1d1p1l1p1n1q1p1o1f1o1t1o1p1k_1q1m1a1i1n1f.pdf (дата последнего обращения: 27.10.2025)