

Формирование «диффузионных» дуг в вакуумных выключателях

АПОЛЛОНСКИЙ С.М., КУКЛЕВ Ю.В.

Представлена модель образования «диффузионных» дуг в вакуумных выключателях, основными механизмами которой являются термоавтоэлектронная эмиссия и бомбардировка поверхности катода положительными ионами и возбужденными атомами. Даются рекомендации по конструкции электродов с лепестками, служащих для формирования «диффузионных» дуг и позволяющих уменьшить силу отброса контактов. На основании исследований авторы пришли к выводам: основными механизмами образования «диффузионных» дуг являются термоавтоэлектронная эмиссия и бомбардировка поверхности катода положительными ионами и возбужденными атомами; практически все сталкивающиеся с металлической поверхностью ионы нейтрализуются; использование в конструкции вакуумных дугогасительных камер трубчатых электродов с лепестками уменьшает искривления формы контурного тока, а следовательно, уменьшает силу отброса контактов и создает условия работы тепловой трубки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: «диффузионные» дуги, вакуумные выключатели, вакуумные дугогасительные камеры

При разработке вакуумных аппаратов перед конструктором возникают затруднения в проектировании вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), задача которой не только осуществить быстрое гашение электрической дуги, но и быстро восстановить электрическую прочность в контактном растворе. Следует отметить, что электрическая дуга в вакууме существует в двух видах: «диффузионном» при токах до 5000–7000 А и в единой концентрированной форме при больших значениях тока. При правильном выборе материала для электродов форма и размеры контактной системы для данного значения тока не позволяют осуществить переход «диффузионных» дуг в единую концентрированную форму, которую погасить сложнее. Переход дуги из одного состояния в другое зависит также от физики их формирования.

В дугогасительных устройствах вакуумных выключателей значение абсолютного давления находится в диапазоне $1,3 \cdot 10^{-2} \div 1,3 \cdot 10^{-5}$ Па. При таких низких давлениях возникновение электрического пробоя между электродами затруднено. Кроме того, у материала контактной системы, находящейся в замкнутом состоянии, снижается твердость и повышается пластичность. Это усложняет работу вакуумного выключателя при длительном включении на номинальные токи. В результате надежнее отключать кратковременные предельные токи, чем использовать аппарат при длительном пропуске даже малых токов. Вакуум вносит в процесс горения и гашения электрической дуги некоторые особенности. В начальный момент расхождения контактов между ними появляется расплавленный металлический мостик, который нагревается при протекании тока до температуры кипения и испарения. При дальнейшем расхождении контактов мос-

тик разрушается, образуя металлические пары, способствующие формированию «диффузионных» дуг (нитевых разрядов), существующих независимо друг от друга, хотя физические процессы в траекториях взаимозависимы. Процессы образования их в вакуумных выключателях являются недостаточно исследованными. В основном полагают, что термоэлектронная эмиссия с разогретого катода может быть источником необходимых носителей электричества в межэлектродной зоне.

Однако с позиций теории термоэлектронной эмиссии нельзя объяснить ряд наблюдаемых характеристик катодных процессов, в том числе нельзя обосновать явление переноса тока в зоне катода, изготовленного из наиболее распространенных контактных материалов (меди, серебра и пр.), допускающих лишь относительно невысокие предельные температуры нагрева (температуры кипения). Не удастся также объяснить механизм переноса тока в контактном промежутке только с позиций теории автоэлектронной эмиссии. Этот процесс будет наблюдаться, когда температура металла низка и присущая частицам внутренняя энергия мала. В этом случае выход электронов из металла может произойти за счет внешних сил электрического поля, возникающего в контактном растворе после распада жидкометаллического мостика как результат интенсивного восстановления напряжения сети. Такое предположение справедливо, так как электрический разряд образует часть электрической цепи.

В свою очередь, автоэлектронная эмиссия вызывает необходимость допустить высокие плотности тока с катода (до 10^7 А/см²), а это приведет к сильному локальному разогреву материала катода и возникновению термоэлектронной эмиссии, т.е. к

выходу электронов без приложения внешних сил. Между этими крайними режимами должны, очевидно, существовать промежуточные, когда эмиссия электронов под действием электрического поля усиливается из-за нагрева металла до определенной температуры.

Модель физических процессов в вакуумных выключателях. Согласно современным физическим представлениям металл состоит из мельчайших кристаллов, в узлах решеток которых находятся атомы и положительные ионы. На движения отдельных свободных электронов в металле не влияют ядра атомов. Внутри их удерживают положительные ионы. Условия выхода электрона из катода определяются энергетическим уровнем, который он занимает. По законам квантовой статистики в каждом энергетическом состоянии находится не более одного электрона. При температуре абсолютного нуля электрон занимает энергетический уровень, называемый уровнем Ферми. Но в металлах имеется энергетическая зона с уровнями выше уровня Ферми, которые остаются незаполненными при абсолютном нуле. При нагреве электроны могут переходить на эти более высокие уровни.

На границе металла существует потенциальный барьер, который надо преодолеть электрону, чтобы выйти из металла. Сила притяжения электрона к положительным ионам, составляющим кристаллическую решетку металла, не позволяет ему выйти за пределы поверхности металла. Если бы часть свободных электронов металла «пошла» на образование электронного облака над его поверхностью, то в металле образовался бы недостаток электронов в сравнении с общим положительным зарядом ионов. Это обстоятельство оказывает тормозящее действие на выход электронов, т. е. формирует на границе металла потенциальный барьер, форма которого зависит от наличия внешнего электрического поля.

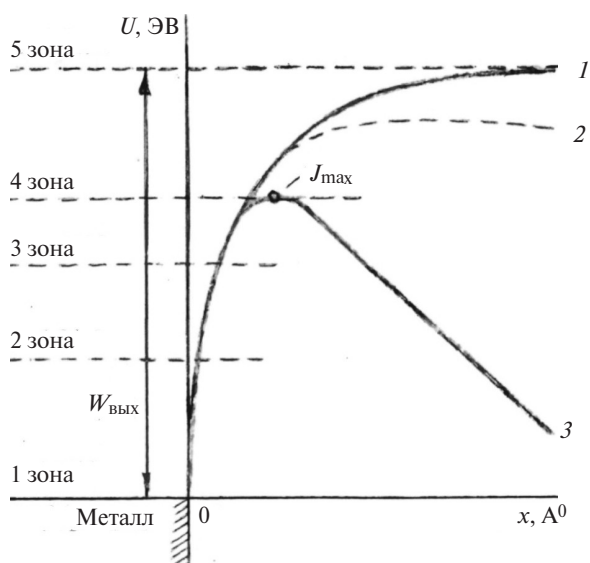


Рис. 1. Потенциальный барьер

На рис. 1 представлены кривые потенциального барьера: при отсутствии внешнего электрического поля (кривая 1); при слабом поле (кривая 2); при сильном электрическом поле (кривая 3). Как видно, ширина барьера определяется напряженностью электрического поля. При слабом поле ширина барьера значительно больше, чем при сильном. В металле можно выделить пять характерных зон.

Крайняя зона 1 будет соответствовать чистой автоэлектронной эмиссии при $T=0$, а крайняя зона 5 относится к чистой термоэлектронной эмиссии при $E=0$. В зоне 1 энергия электронов не превышает уровень Ферми. В зонах 2 и 5 электроны занимают более высокие энергетические уровни. В зонах 2 и 3 электроны покидают металл вследствие туннельного эффекта. Ток здесь зависит не только от ширины барьера, определяемой напряженностью внешнего поля E , но и от температуры металла: чем выше температура, тем более высокий энергетический уровень может иметь электрон. Для выхода из металла ему надо преодолеть потенциальный барьер, определяемый разностью между U_{max} (вершина) и собственным энергетическим уровнем, повышающимся с температурой. Вследствие того, что эмиссия электронов в зонах 2 и 3 зависит от температуры металла и напряженности внешнего поля, она носит название термоавтоэлектронной. В зоне 4 наблюдается термоэлектронная эмиссия, интенсивность которой усиливается вследствие эффекта Шоттки. Согласно этому эффекту внешнее электрическое поле, проникая в металл, приводит к перераспределению зарядов, что уменьшает работу выхода.

Ввиду быстрого процесса отключения металлический мостик, возникающий между расходящимися контактами, не успевает нагреться до температуры кипения. Поэтому происходит механическое его разрушение. Однако процесс разрушения сопровождается резким повышением напряжения, а также резким броском тока. Температура мостика на этой стадии достигает значений температуры кипения и испарения. Распад происходит при небольших расстояниях, образуя при электродных областях облако металлического пара. Поэтому можно считать, что большая часть тепловой мощности, выделяющейся в контактном растворе, поглощается электродами. Проводимость этого облака может носить характер чисто металлической проводимости, облако является как бы продолжением катода. В облаке пара, нагретого до высокой температуры, электроны занимают высокие энергетические уровни зоны проводимости, превышающие уровень Ферми. Термоавтоэлектронная эмиссия этих электронов и обеспечивает условия переноса тока в катодной зоне дуги.

В условиях плотного заполнения электронами верхних уровней зоны проводимости резко снижаются требования к напряженности электрического

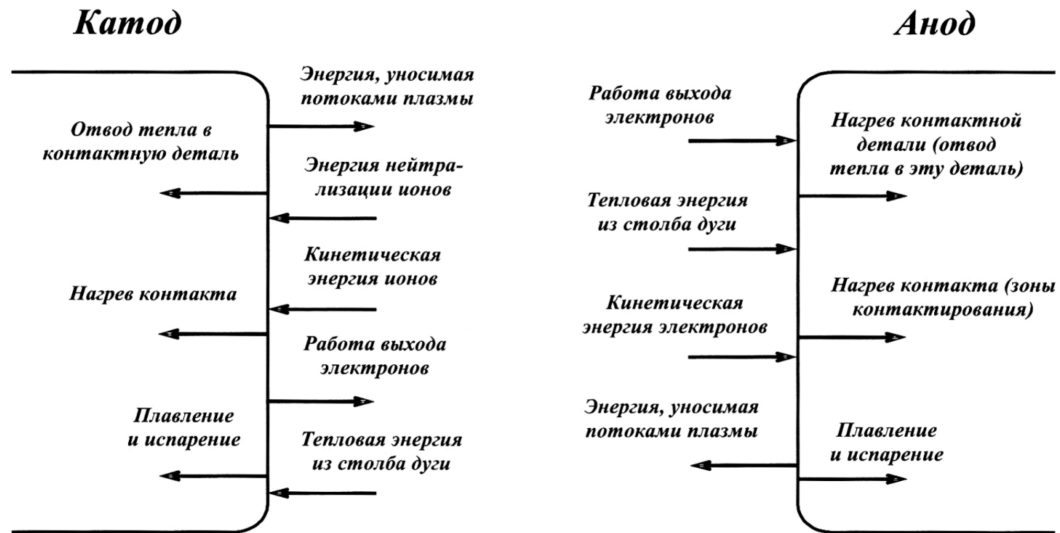


Рис. 2. Баланс энергии на электродах

поля, достаточного для эмиссии необходимого количества электронов, обеспечивающих перенос тока в зоне катода. Количество энергии в граничной зоне катодной области будет равно $E = CU/2$, где U — напряжение, возникающее при разрыве жидкого металлического мостика; C — емкость в растворе контактов.

Вероятность ионизации паров металла [1]:

$$P_i = A \exp\left(\frac{\varphi - \varphi_i}{kT}\right),$$

где φ_i — потенциал ионизации; φ — энергия ионизирующих электронов; T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана; A — постоянная, зависящая от материала и формы контактов; для материалов и меди, серебра и вольфрама $\varphi_i = 8$ эВ.

Картина баланса энергии дуги как в прикатодной, так и в прианодной зонах схематично представлена на рис. 2. К катоду подводятся энергия нейтрализации положительных ионов, приходящих из металлических паров, и их кинетическая энергия при ударе. На аноде и катоде выделяется тепловая энергия, передаваемая из металлических паров. На катоде и аноде расходуется энергия на нагрев контактного пятна и отвод теплоты в контактную деталь, а также на плавление и испарение контактного материала. Наличие ионного тока у катода создает сильное электрическое поле. На катоде энергия расходуется на создание работы выхода электронов, затрачиваемой на преодоление потенциального барьера на поверхности металла. Вышедшие электроны сосредоточиваются в области анода, создавая электронное облако.

Рассмотрим явления, сопровождающие столкновение иона и метастабильных (возбужденных) атомов с металлической поверхностью при энергиях в диапазоне от нуля до нескольких десятков электрон-вольт.

Процессы при таких столкновениях вызывают большой практический интерес не только у специалистов в области вакуумных аппаратов, но и в катодной электронике, и в аэродинамике разреженных газов. После некоторых упругих и неупругих столкновений ионов и возбужденных атомов с поверхностью катода электроны покидают металл и дрейфуют в электрическом поле $E = U/d$ с постоянной скоростью v_- , где d — расстояние между электродами. Ввиду высокой концентрации электронов в металле (приблизительно 10^{22} см⁻³) упрощается возможность получения высокой плотности тока как результата бомбардировки ионами и возбужденными атомами катода. Электронный ток, порождаемый бомбардировкой ионами катода,

$$I_- = \frac{en}{T_-} \exp(av_-t),$$

где n — число электронов, стартующих одновременно с катода; e — заряд электрона; a — среднее число ионизирующих столкновений электронов на 1 см в течение времени t [2].

Возможно, процесс формирования диффузионных дуг в вакууме проходит при отсутствии стримерного механизма. Эксперименты пока не дали четкого объяснения по этому вопросу.

При столкновении частиц с металлической поверхностью возможны следующие переходы [3]:

резонансная нейтрализация иона; результат — возбужденный атом;

резонансная ионизация возбужденного атома; результат — ион и возбужденный электрон металла;

оже-нейтрализация иона; результат — атом в основном состоянии и возбужденный электрон металла;

переход возбужденного атома с захватом электрона металла в основное состояние с передачей

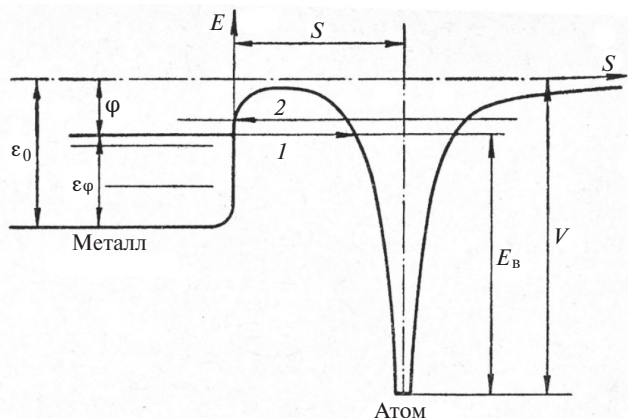


Рис. 3. Резонансная нейтрализация иона (переход 1) и резонансная ионизация возбужденного атома (переход 2): ϵ_0 — энергия свободного электрона; $E_{\text{в}}$ — работа выхода; ϵ_{φ} — энергия второго электрона после перехода; φ — энергия возбужденного электрона; V — потенциал ионизации (зависит от расстояния до поверхности металла S , т.е. $V(S)$)

освобождающейся энергии электрону, находившемуся на возбужденном уровне.

Иллюстрацией перечисленных переходов будет модель Зоммерфельда (рис. 3).

При приближении иона (или возбужденного атома) происходит один из перечисленных выше переходов с возбуждением вторичного электрона внутри металла. При этом импульс электрона \bar{p} направлен, вообще говоря, случайным образом. Если проекция импульса на нормаль к поверхно-

сти p_n положительна и энергия нормального движения превышает работу выхода, то электрон покидает пределы металла и становится свободным. В противном случае энергия, полученная им, рассеивается внутри металла.

Кроме нейтрализации и выбивания вторичных электронов, возможно еще образование отрицательно заряженного иона.

Расчет механизма выбивания электронов падающими ионами и возбужденными атомами описан в [3], где проанализированы экспериментальные исследования многих авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992, 536 с.
2. Ульянов К.Н. Физическая модель образования анодного пятна в сильноточной вакуумной дуге. — Теплофизика высоких температур, 2003, т. 41, № 2, с. 167.
3. Мещеряков В.П. Электрическая дуга большой мощности в выключателях. Часть II. Ульяновск: ОАО «Контактор», 2008, 429 с.

[24.06.2019]

А в т о р ы: Аполлонский Станислав Михайлович — доктор техн. наук, научный консультант ООО «Центр электромехатроники», диссертацию защитил в 1988 г.

Куклев Юрий Васильевич — кандидат техн. наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, диссертацию защитил в 1982 г.

Electrichestvo, 2020, No. 1, pp. 51–54

DOI:10.24160/0013-5380-2020-1-51-54

Generation of Diffusion Arcs in Vacuum Circuit Breakers

APOLLONSKY Stanislav M. (LLC «Centre of Electromechatronics», St. Petersburg, Russia) — Scientific Consultant, Dr. Sci. (Eng.)

KUKLEV Yuri V. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

A model describing the generation of “diffusion” arcs in vacuum circuit breakers, the key mechanisms of which are thermo-auto-electronic emission and bombarding the cathode surface with positive ions and excited atoms, is presented. Recommendations on the design of electrodes with petals that serve for generating “diffusion” arcs and make it possible to decrease the contact drop-back force are given. The following conclusions have been drawn based on the study results: Thermo-auto-electronic emission and bombarding the cathode surface with positive ions and excited atoms are the key mechanisms governing the generation of “diffusion” arcs. Almost all ions colliding with the metal surface become neutralized. The use of tubular electrodes with petals in the design of vacuum arc quenching chambers makes it possible to decrease the warping of loop current and, hence, to reduce the contact drop-back force and create the heat tube operation conditions.

Key words: *diffusion arcs, vacuum circuit breakers, vacuum arch quenching chambers*

REFERENCES

1. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* (Gas discharge physics). Moscow, Nauka, 1992, 536 p.
2. Ul'yanov K.N. *Teplofizika vysokikh temperature — in Russ. (Thermal Physics of High Temperature)*, 2003, vol. 41, No. 2, p. 167.

3. Meshcheryakov V.P. *Elektricheskaya duga bol'skoi moshchnosti v vyklyuchatelyakh* (High-power electric arc in circuit breakers). Part II. Ul'yanovsk, JSC «Konfaktor», 2008, 429 p.

[24.06.2019]