

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ШАРАЕВСКИЙ Владимир Николаевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Специальность С5.14.12. - Техника высоких напряжений

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1992



00819701 (Q)

Работа выполнена в Институте

- Научный руководитель: доктор технических наук  
профессор Ю. П. Емец
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Р. В. Ганефельд  
кандидат технических наук  
В. М. Кириленко
- Ведущая организация: Институт электросварки  
им. Е. О. Патона АН Украины

Защита диссертации состоится "23" июля 1992 г.  
в 15 часов на заседании специализированного совета К 068.14.05  
по присуждению ученых степеней кандидата технических наук в Киевском  
политехническом институте (корпус №20, ауд. 3).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 252056 г. Киев - 56,  
проспект Победы, 37, КИИ, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского политехнического института.

Автореферат разослан "23" октября 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук,  
профессор

*В. Н. Кондра*

В. Н. Кондра

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН УРСР

Цель работы - разработка теоретической модели несамостоятельного электрического разряда в нагретых газах, исследование электрической прочности газов при нагреве до температур  $\sim 2000\text{K}$ .

В диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработана теоретическая модель несамостоятельного электрического разряда в газах при температурах  $300-2000\text{K}$ .
2. Проанализировано влияние температуры на элементарные процессы в газе. Исследованы процессы на поверхности электродов в зависимости от их температуры.
3. Выполнены теоретические исследования характеристик несамостоятельного разряда и закономерностей пробоя в электроположительных и электроотрицательных газах (аргоне, азоте и воздухе).
4. Получены критерии пробоя газоразрядного промежутка при высоких температурах.
5. Разработан метод расчета электрической прочности нагретых газов.
6. Исследованы характеристики устройств для измерения температуры электропроводных тел.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Математическая модель несамостоятельного электрического разряда в газах при температурах  $300-2000\text{K}$ .
2. Алгоритмы и программы расчета характеристик разряда в однокомпонентных газах и газовых смесях.
3. Результаты исследования характеристик разряда в аргоне, азоте и воздухе с учетом влияния температуры на элементарные процессы в разрядном промежутке.
4. Критерии пробоя газоразрядного промежутка в условиях высоких температур.
5. Метод расчета электрической прочности нагретых газов.
6. Принципы построения устройств для измерения температуры электропроводных тел.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Расширение сферы использования газоразрядной плазмы, совершенствование электротехнического и технологического оборудования требует развития исследований в области физики газового разряда. В ряде устройств электрический разряд происходит в нагретых газах. К таким устройствам относятся термоэмиссионные преобразователи энергии, электрокоммутационные аппа-

раты, различные электротехнологические установки. При разработке подобных устройств требуются сведения об электрической прочности нагретых газов.

Большинство исследований электрической прочности нагретых газов выполнены экспериментально. Наиболее надежные результаты приведены в работах Г. Боукера, Л. Алстона, И. В. Болко, Н. И. Фальковского, М. Нагаты, Я. Йокои, И. Миячи. Теоретическому изучению пробоя газов при высоких температурах посвящено небольшое число работ. Применяемые авторами этих работ упрощенные модели не позволяют объяснять все наблюдающиеся в экспериментах закономерности, надежно рассчитывать электрическую прочность.

Отсутствие в настоящее время полной ясности в вопросе пробоя нагретых газов делает необходимым развитие теоретических методов исследования. Использование таких методов позволит не только объяснить имеющиеся экспериментальные данные, но и расширить представления о механизме пробоя, получить новые данные по электрической прочности нагретых газов.

Отмеченные обстоятельства свидетельствуют об актуальности настоящей работы, направленной на разработку математической модели и исследование характеристик электрического разряда в нагретых газах. Тема диссертации непосредственно связана с работами проводимыми в Институте электродинамики АН Украины по темам "Ротор" (N Гос. регистрации 0.187.0052776, выполненной по постановлению Президиума АН Украины N 451 от 29.12.1986 г. Проблема: 1.9.2.3), "Полко", выполняемой по распоряжению Бюро ОФТИЭ АН Украины от 03.12.1990 г. Протокол N 8.

Методы исследования. Для исследования характеристик разряда в нагретых газах использовалась математическая модель, полученная в результате критериального анализа уравнений переноса и уравнения Пуассона. Решение систем дифференциальных уравнений выполнено с использованием численных методов на ПЭМ.

#### Научная новизна.

1. Предложена математическая модель несамостоятельного разряда в газах при температурах 300-2000 К.
2. Разработаны алгоритмы и программы расчета характеристик разряда, метод определения пробивных напряжений.
3. Рассчитаны характеристики разряда в аргоне, азоте и воздухе, нагретых до 2000 К, с учетом влияния температуры на элементар-

ные процессы в газе. Объяснены наблюдавшиеся в экспериментах закономерности.

4. Изучено влияние прилипания электронов в электроотрицательных газах на разрядные характеристики в условиях высоких температур.

5. Обнаружено, что пробое нагретого газа предшествует зажигание в промежутке самостоятельного разряда типа тлеющего. Получены критерии зажигания такого разряда.

6. Показано, что при пробое нагретых газов определяющую роль играет ток термоэлектронной эмиссии с катода. Отклонения пробивных характеристик нагретых газов от закона Пашена вызваны значительными величинами тока термоэлектронной эмиссии.

Практическая ценность. Математическая модель разряда, алгоритмы и программы расчета, метод расчета пробивных напряжений могут быть использованы при определении разрядных характеристик в нагретых газах. Результаты расчета позволили установить основные закономерности пробоя в таких условиях. Исследованы характеристики устройств для измерения температуры электропроводных тел.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы нашли практическое применение при развитии неконтактного метода определения температуры нагретых тел и разработке устройств для измерения температуры. Ряд конструктивно различных устройств внедрены на Кировском заводе по обработке цветных металлов, Иркутском алюминиевом заводе, Красноярском металлургическом заводе.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на XI X-й Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (Белград, 1989), V-й Всесоюзной конференции по физике газового разряда (Омск, 1990), VIII-й Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Минск, 1991), Всесоюзном научно-техническом совещании "Пути ускорения научно-технического прогресса в метизном производстве" (Магнитогорск, 1990), научных семинарах отдела электрофизики преобразования энергии Института электродинамики (Киев, 1986-1992).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения,

пяти глв, заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста, списка литературы из 104 наименований, 2 приложений и иллюстрируется 27 рисунками и 3 таблицами.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, сформулирована цель исследований, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий обзор областей науки и техники, где может наблюдаться пробой нагретых газов. Результаты обзора показывают, что условия, в которых происходит пробой (давление, температура, состав газов, геометрия межэлектродного промежутка) меняются в широких пределах. Исследование процессов в этом случае облегчается при использовании теории подобия. При изучении электрического пробоя газов наиболее часто используют следующие параметры подобия:  $E/\rho$ ,  $\rho L$ ,  $\alpha/\rho$ ,  $j/\rho^2$ , где  $E$  - напряженность электрического поля,  $\rho$  - давление газа,  $L$  - длина разрядного промежутка,  $\alpha$  - ионизационный коэффициент Таунсенда,  $j$  - плотность тока. В ряде случаев существуют однозначные зависимости между параметрами подобия - законы подобия. Примерами законов подобия являются зависимости отношения ионизационного коэффициента Таунсенда к давлению от параметра  $E/\rho$  и зависимость пробивных напряжений от параметра  $\rho L$  - закон Пашена.

Исследования электрической прочности нагретых газов в своем большинстве связаны с выяснением вопроса о выполнении закона Пашена. Ранние исследования по этому вопросу давали положительный ответ. Однако, по мере роста температуры, на некоторых экспериментальных установках были обнаружены отклонения от закона Пашена. Анализ литературы показал, что экспериментальные работы по пробоя нагретого газа можно разделить на три группы в зависимости от типа опытных установок: эксперименты, проведенные с использованием ударных труб, опыты на плазматронах и электрических печах. В первых двух группах легко получить температуры выше 2000 К. Однако существует ряд трудностей в обработке экспериментальных данных на таких установках. В целом, исследования электрической прочности с применением ударных труб и плазматронов показали, что предельная температура  $T_p$ , до которой изменения пробивных напряжений описываются законом Пашена, в воздухе, азоте, углекислом газе, аргоне и гелии находится в пределах 2000-2200 К.

Экспериментальные исследования, выполненные в электрических печах лишены недостатков, присущих экспериментам на ударных трубах и плавмотронах. В настоящее время они представляются наиболее надежными. Однако в этом случае существует проблема получения высоких температур в экспериментальных установках. Существующие экспериментальные данные, для однородного теплового поля, получены при  $T < 2000$  К. Результаты исследований пробоа газов в электрических печах показвали, что величина  $T_p$  находится в пределах 1200-1800 К.

Теоретические работы, посвященные исследованиям электрической прочности нагретых газов, не учитывают влияния температуры на элементарные процессы в газе. Такой подход не позволяет надежно определять электрическую прочность газов при высоких температурах. Поэтому разработка полной теоретической модели несамостоятельного разряда в нагретых газах необходима.

Вторая глава посвящена разработке математической модели разряда. Проанализировано влияние температуры на элементарные процессы в разрядном промежутке. Разработан способ решения полученной системы дифференциальных уравнений.

В основу математической модели положены уравнения переноса для электронов и ионов, уравнение Пуассона. Упрощение исходной системы уравнений выполнено на основе анализа критериев подобия, полученных с учетом экспериментальных данных. В результате предложена система уравнений, описывающая стационарное состояние разряда в нагретых газах. Система уравнений включает в себя уравнения непрерывности и движения для всех видов заряженных частиц (ЗЧ), уравнение энергии для электронов и уравнение Пуассона:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} (n_j \vec{w}_j) = \sum_k S_{jk} - \sum_l Q_{lj}, \\ z_j e n_j \vec{E} - m n_j \nu_{jm} \vec{w}_j = 0, \quad m = m_j M / (m_j + M), \\ e n_e \vec{w}_e \vec{E} - \frac{3}{2} \delta \nu_{em} n_e T_e - \left( \frac{3}{2} T_e + J \right) \left( \sum_k S_{ke} - \sum_l Q_{le} \right) = 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} = e \sum_j n_j z_j, \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $n_j$  - плотность ЗЧ;  $j$ -индекс, обозначающий вид ЗЧ (в дальнейшем электронам будет соответствовать индекс  $e$ , ионам -  $i$ , положительным

ионам  $-p$ , отрицательным  $-n$ );  $\vec{W}_j$  - вектор дрейфовой скорости;  $S_{kj}$  - частота образования ЗЧ по  $k$ -му механизму;  $\omega_{qj}$  - частота ионизации ЗЧ по  $l$ -му механизму;  $Z_j$  - относительный заряд частиц (для электрона  $Z_e = -1$ );  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля;  $m_j$  - масса ЗЧ;  $M$  - масса нейтральной частицы;  $\nu_{jm}$  - частота столкновений ЗЧ с нейтральными частицами;  $T_e$  - температура электронов в энергетических единицах;  $\delta$  - доля энергии, теряемая электронами при столкновениях с нейтральными частицами;  $J$  - потенциал ионизации нейтральной частицы;  $\vec{D}$  - вектор индукции электрического поля;  $\varphi$  - потенциал электрического поля;  $e$  - заряд электрона.

Уравнения (1) рассматриваются с граничными условиями следующего вида: на катоде -  $j_e = j_0 + \gamma j_p$ ,  $j_n = 0$ ,  $\varphi = 0$ ; на аноде -  $j_p = 0$ ,  $\varphi = U$ , где  $j_e, j_p, j_n$  - плотности тока электронов, положительных и отрицательных ионов соответственно;  $j_0$  - плотность тока термоэлектронной эмиссии;  $\gamma$  - эффективный коэффициент вторичной эмиссии;  $U$  - напряжение прикладываемое к промежутку.

Число уравнений в системе (1) может быть уменьшено при использовании вместо уравнений движения и энергии экспериментальных результатов по дрейфовым скоростям ЗЧ и средней энергии электронов. Для обоснования возможности такой замены в диссертации исследовано влияние температуры газа на элементарные процессы в разрядном промежутке. Установлено, что перед пробоем аргона, азота и воздуха при температурах газа  $T < 2000$  К функция распределения электронов по энергиям не зависит от температуры нейтральных частиц. Поэтому, для определения дрейфовой скорости и средней энергии электронов использованы экспериментальные результаты различных авторов, полученные при  $T \approx 300$  К.

Анализ влияния температуры на дрейфовую скорость ионов показал, что увеличение температуры газа от 300 К до 2000 К, при значениях параметра  $E/p = 20-40$  В/см мм.рт.ст., приводит к снижению величин  $W_i$  в 1,8-2,1 раза. Определено выражение, позволяющее для нахождения  $W_i$  использовать экспериментальные результаты, полученные при  $T \approx 300$  К:

$$W_i(T) = W_i^{экс} \cdot \frac{1 + \beta_1(T) \frac{N}{E}}{1 + \beta_1(T=300K) \frac{N}{E}}, \quad \beta_1(T) = -\frac{3}{4} \left( \frac{m_i}{m_i + M} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{T\sigma}{e} \right) \quad (2)$$

где  $W_i(T)$  - значение дрейфовой скорости ионов при  $T > 300$  К;  $W_i^{экс}$  - экспериментальная величина дрейфовой скорости, полученная при  $T =$

$\approx 300$  К;  $N$  - плотность газа;  $\sigma$  - сечение столкновения иона с нейтральной частицей. Использование выражения (2) позволило исключить из системы (1) уравнение движения для ионов. Таким образом, исходная система уравнений (1) сводится к системе уравнений непрерывности и уравнения Пуассона, дополненную экспериментальными результатами по величинам дрейфовых скоростей ЭЧ и средней энергии электронов.

Для решения такой системы уравнений, записанной для одномерного случая, был разработан итерационный метод. Решение уравнений непрерывности находилось методом Рунге-Кутты, уравнения Пуассона - методом Эйлера.

В третьей главе рассматриваются результаты математического моделирования несамостоятельного разряда в нагретых электроположительных газах, изучаются закономерности пробоя. Объектом исследования выбраны аргон и азот. Моделирование проводилось для условий: давление газа - 760 мм. рт. ст., температура 300-2000 К, длина разрядного промежутка  $L = 0,025-0,5$  см. Предполагалось, что поперечные размеры электродов значительно превышают величину  $L$ , тепловое поле в промежутке - однородно.

Расчеты показывают, что с ростом температуры в результате увеличения тока термоэлектронной эмиссии в промежутке возрастают плотности всех ЭЧ. Перед пробоем плотность ионов практически по всей длине разрядного промежутка превышает плотность электронов. При температурах 1500-2000 К величина  $n_p$  у катода повышается до  $3-6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> ( $n_p \approx 10^8-10^9$ ). Такая концентрация положительных ионов вызывает существенное искажение электрического поля. Обнаружено, что при температурах, превышающих  $T_n$ , увеличение напряжения приводит к условиям, когда в результате искажения электрического поля, напряженность поля у анода стремится к нулю:

$$E(x=L) \rightarrow 0, \quad (3)$$

а условие самостоятельности разряда  $\int_0^L dx = \ln(1 + \frac{1}{\beta})$  не выполняется ( $x$  - координата по длине промежутка). В этом случае в промежутке зажигается разряд, который можно назвать несамостоятельным разрядом типа тлеющего (НРТТ), поддерживаемым за счет тока термоэлектронной эмиссии с катода. При расчете, для  $T > T_n$  в качестве пробивных напряжений принимались напряжения зажигания НРТТ. Расчетные данные совпадают с экспериментальными результатами. Анализ расчетных характеристик разряда показал, что условие (3) выполняется при определенных значениях плотности тока поло-

жительных ионов на катоде  $j_p^{kp}$ . Эта величина в аргоне и азоте определяется выражением:  $j_p^{kp} \approx 2,5 \cdot 10^{-3} / L^2$ , А/см<sup>2</sup>. Для известной величины  $j_p^{kp}$ , критерий пробоя записывается в виде:

$$j_0 \frac{\exp\left(\int_0^L \alpha dx\right) - 1}{1 - \gamma \left(\exp\left(\int_0^L \alpha dx\right) - 1\right)} = j_p^{kp} \quad (4)$$

С помощью критерия (4) объяснены наблюдающиеся в экспериментах закономерности, установлено, что причиной отклонения температурных зависимостей пробивных напряжений от закона Пашена является увеличение токов термоэлектронной эмиссии до величин, при которых скорость появления электронов за счет термоэмиссии становится сравнимой со скоростью образования ЗЧ за счет других процессов, протекающих в разряде.

В четвертой главе исследуются характеристики разряда в нагретом воздухе.

Анализ механизмов образования и исчезновения ЗЧ в воздухе позволил выделить четырнадцать основных реакций, в результате которых в разряде существуют электроны, положительные ионы  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ , отрицательные ионы  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $O_3^-$ . Расчет плотностей ЗЧ проводился с учетом температурных зависимостей констант скоростей разрушения отрицательных ионов  $O^-$ ,  $O_2^-$ . Результаты расчета показали, что как и для электроположительных газов, в воздухе с ростом температуры увеличиваются концентрации всех ЗЧ (рис. 1). Перед пробоем основным видом ЗЧ являются положительные ионы. При температурах 1400-2000 К электрическое поле в промежутке искажено полем объемного разряда положительных ионов, происходит переход к НРТТ. Температурные зависимости пробивных напряжений в указанном диапазоне температур не подчиняются закону Пашена (рис. 2).

Учитывая отсутствие надежных данных по константам отдельных реакций, в диссертации исследовалось влияние процессов образования и разрушения отрицательных ионов на величины плотностей ЗЧ. Установлено, что перед пробоем промежутка величины плотности электронов и положительных ионов определяются процессом ударной ионизации электронами и значением тока термоэлектронной эмиссии. Лишь для промежутков с  $L \gg 0,3$  см, при  $T > 1800$  К (значения параметра  $E/p$  перед пробоем в таких условиях снижаются до 50-60 В/см·мм. рт. ст.) процессы прилипания электронов и разрушения отрицательных ионов влияют на величины  $n_e$ ,  $n_p$ .

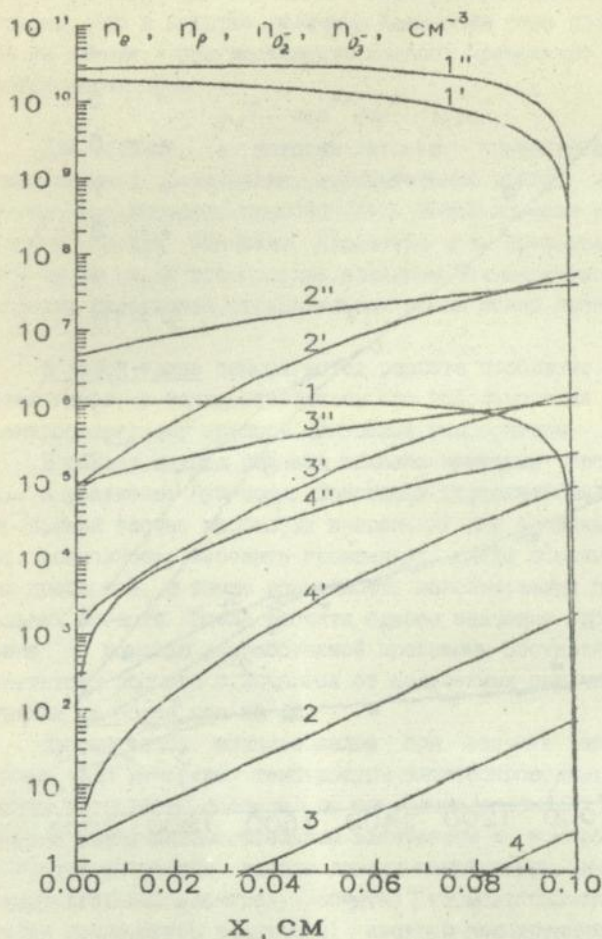


Рис. 1. Воздух. Распределения плотностей заряженных частиц по длине промежутка при напряжениях, близких к пробивным,  $L = 0,1$  см,  $\varphi_b = 4,7$  эВ: 1 -  $n_p$ ; 2 -  $n_e$ ; 3 -  $n_n$  (отрицательные ионы  $O_2^-$ ); 4 -  $n_n$  ( $O_3^-$ ). 1 - 4 -  $T = 1200$  К,  $U = 1575$  В; 1' - 4' - 1600 К, 1250 В; 1'' - 4'' - 1800 К, 825 В.  $\varphi_b$  - работа выхода материала катода.

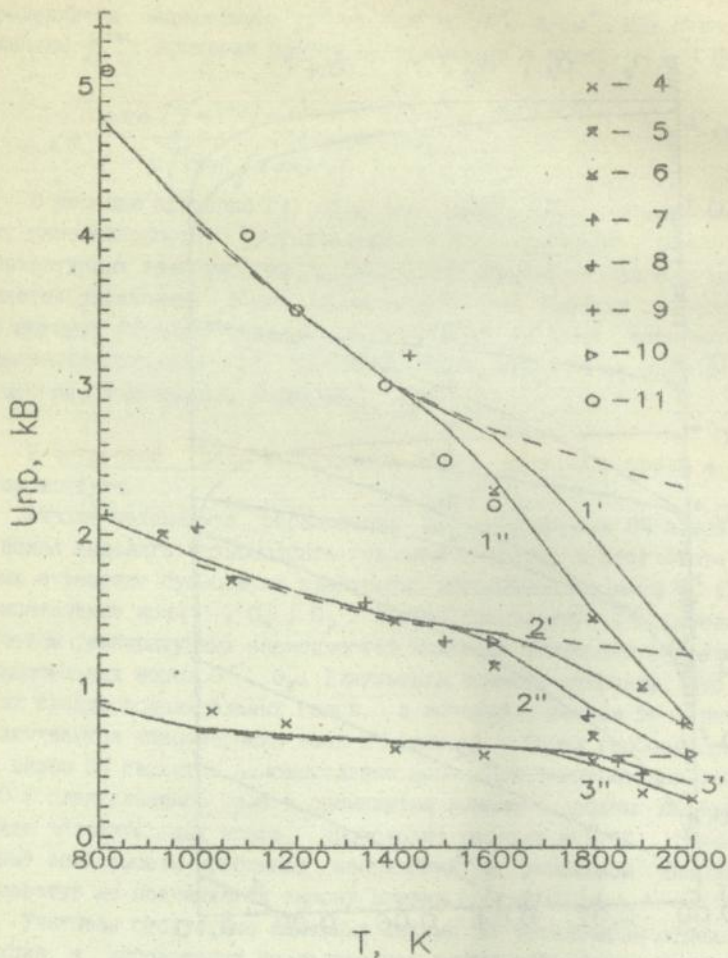


Рис. 2. Зависимости пробивных напряжений воздуха от температуры: 1'-3' -  $\frac{1}{8}$  = 5,32 эВ; 1''-3'' - 4,7 эВ; 1 - L = -0,3 см; 2 - 0,1 ; 3 - 0,025. Штриховыми линиями показаны напряжения пробоя в соответствии с законом Папена. Экспериментальные данные : электроды: 4-6 - ZrO<sub>2</sub>; 7-9 - Pt, PtRh-10, PtRh-30; 10 - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 11 - MoSi<sub>2</sub>. Межэлектродное расстояние: 4,7-L - 0,025 см; 5, 8, 10 - 0,1 см; 6, 9, 11 - 0,3 см.

В случае, если ударная ионизация электронами и термоэлектронная эмиссия являются основными источниками ЗЧ, критерий пробоя (4) может быть использован и в электроотрицательных газах. Установлено, что в воздухе величина плотности тока положительных ионов на катоде, при достижении которой происходит пробой, определяется выражением:

$$j_{\rho}^{np} = 10^{-5} / L^2, \text{ А/см.}^2 \quad (5)$$

Для условий, в которых нельзя пренебрегать процессами образования и разрушения отрицательных ионов, получен критерий пробоя, вид которого подобен (4). Использование его возможно при условии, когда значения параметра  $E/\rho$  превышают величину 40 В/см·мм.рт.ст. В этом случае влиянием температуры на константы скорости разрушения отрицательных ионов можно пренебречь.

В пятой главе описан метод расчета пробивных напряжений нагретых газов, а также результаты его использования применительно к электроразрядному способу измерения температуры.

В основу метода расчета положен критерий пробоя промежутка (4) и уравнение Пуассона. Основными достоинствами метода являются: прямой расчет пробивных напряжений для заданных исходных данных, возможность избежать громоздких, плохо сходящихся итерационных процессов, а также возможность использования простых вычислительных средств. Время расчета одного значения пробивного напряжения с помощью разработанной программы составляло 3-4 секунды. Результаты расчета отличаются от полученных при численном моделировании не более чем на 4%.

Данный метод использовался при расчете характеристик устройств для измерения температуры электропроводных тел. Принцип работы устройств основан на измерении пробивных напряжений промежутка между вспомогательным электродом и контролируемым телом. В состав устройств входят датчик температуры (включающий себя вспомогательный электрод, обмотку термостабилизации электрода, датчик температуры электрода, несущую конструкцию), источник питания, блок измерения пробивных напряжений с преобразователем их в значения температуры контролируемого тела, блок термостабилизации электрода.

В диссертации исследовались характеристики, оказывающие наибольшее влияние на точность определения температуры контролируемого тела: чувствительность пробивного напряжения к температуре, к расстоянию между вспомогательным электродом и контролируемым те-

лом и к работе выхода материала поверхности контролируемого тела. Установлено, что для повышения точности измерения температур, при эксплуатации устройства в условиях, когда температура контролируемого тела не превышает величину  $T_n$ , полярность вспомогательного электрода должна быть отрицательной. Если измеряемая температура превышает величину  $T_n$  и работа выхода материала поверхности контролируемого тела не изменяется в процессе измерения, полярность вспомогательного электрода должна быть положительной. В случае, когда работа выхода материала поверхности может изменяться в результате различных физико-химических процессов полярность вспомогательного электрода должна быть отрицательной. Температура его стабилизации - ниже величины  $T_n$ .

Результаты исследований позволили разработать ряд устройств для измерения температуры в различных условиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации исследована электрическая прочность нагретых газов. На основе критериального анализа уравнений переноса и уравнения Пуассона построена теоретическая модель, позволяющая рассчитывать характеристики разряда в газах при температурах до 2000 К. Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана теоретическая модель электрического разряда в нагретых газах, в основу которой положена система уравнений непрерывности и движения для электронов и ионов, уравнение энергии для электронов и уравнение Пуассона.

В результате критериального анализа дифференциальных уравнений получены расчетные модели, описывающие разряд в нагретых электроположительных газах ( $Ar$ ,  $N_2$ ) и газовых смесях, содержащих электроотрицательные компоненты.

2. Исследовано влияние температуры газа с постоянной плотностью на элементарные процессы в разрядном промежутке. Установлено, что:

- для рассматриваемых условий функция распределения электронов по энергиям слабо зависит от температуры газов.

- при увеличении температуры газа и соответствующем изменении энергетического распределения ионов, возрастает скорость разрушения отрицательных ионов и снижается дрейфовая скорость ионов. Из расчетов следует, что влияние температуры газа на константы ско-

рости процессов с участием отрицательных ионов необходимо учитывать при значениях параметра  $E/\rho < 40$  В/см·мм. рт. ст. Влияние температуры на дрейфовую скорость ионов становится существенным при  $E/\rho < 80$  В/см·мм. рт. ст. Предложено уравнение, позволяющее учитывать изменение дрейфовой скорости ионов при увеличении температуры.

3. Исследование характеристик разряда в нагретых электроположительных газах показало, что увеличение температуры приводит к возрастанию концентраций всех заряженных частиц за счет роста плотности тока термоэлектронной эмиссии. При напряжениях, близких к пробивным концентрация положительных ионов в разрядном промежутке значительно превышает концентрацию электронов. Накопление объемного заряда положительных ионов приводит к искажению электрического поля, увеличивающемуся с ростом температуры.

4. Установлено, что в результате искажения электрического поля, при температурах, для которых пробивные напряжения не подчиняются закону Пашена, в промежутке происходит переход к несамостоятельному разряду типа тлеющего, поддерживаемому за счет тока термоэлектронной эмиссии. Напряжения зажигания такого разряда ниже напряжений, определяемых по закону Пашена. Пробивные напряжения в этом случае определяются условиями развития несамостоятельного разряда типа тлеющего. Предложен критерий зажигания такого разряда, с помощью которого объяснены наблюдающиеся на практике закономерности.

5. Исследование характеристик разряда в нагретом воздухе, при наличии отрицательных ионов, проводилось с учетом зависимости констант скоростей процессов от температуры. Установлено, что процессы образования и разрушения отрицательных ионов при значениях параметра  $E/\rho > 50-60$  В/см мм. рт. ст. не оказывают влияния на разрядные характеристики. Такие значения параметра наблюдаются перед пробоем воздушных промежутков длиной  $L < 0,3$  см во вс. м диапазоне исследованных температур и  $L > 0,3$  см при  $T \leq 1800$  К.

Процессы, предшествующие пробоем нагретых электроотрицательных газов, подобны тем, которые имеют место в случае электроположительных газов. При этом с ростом температуры наблюдается увеличение объемного заряда положительных ионов, увеличивается искажение электрического поля, происходит переход к несамостоятельному разряду типа тлеющего. Получен критерий зажигания такого разряда в электроотрицательных газах.

6. Установлено, что причиной отклонений температурных зави-

симостей пробивных напряжений нагретых газов от закона Пашена является увеличение с ростом температуры тока термоэлектронной эмиссии с катода до величин, при которых скорость появления электронов за счет эмиссии становится сравнимой со скоростью появления заряженных частиц за счет остальных процессов, протекающих в разряде.

7. Предложен метод расчета пробивных напряжений нагретых газов, с помощью которого исследованы характеристики устройств для измерения температуры электропроводных тел. На основании этих данных разработаны устройства для измерения температуры в металлургическом производстве.

Своё содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Шараевский В. Н. Система уравнений для описания электрического разряда в нагретых газах // Сб. науч. тр. "Электромагнитные поля в энергетических и технологических установках". - Киев: Ин-т проблем энергосбережения АН УССР, Ин-т электродинамики АН УССР, 1988. - С. 129-134.

2. Шараевский В. Н., Божко И. В. Электрический пробой аргона при температурах 1000-2000 К // Теплофизика высоких температур. - 1990. - Т. 28. - №2. - С. 387-389.

3. Шараевский В. Н., Божко И. В., Фальковский Н. И. Пробой электроположительных газов при температурах до 2500 К // V Всесоюз. конф. по физике газового разряда: Тез. докл. - Омск, 1990. - Ч. 1. - С. 206-207.

4. Фальковский Н. И., Сердюк Ю. В., Шараевский В. Н. Новый способ измерения температуры нагретых электропроводных тел // Всесоюзное научно-техническое совещание "Пути ускорения научно-технического прогресса в металлургическом производстве": Тез. докл. - Магнитогорск, 1990. - С. 25-26.

5. Шараевский В. Н. О зажигании самостоятельного разряда типа тлеющего в нагретых газах // VIII Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы: Тез. докл. - Минск, 1991. - Ч. II. - С. 123-124.

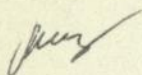
6. Шараевский В. Н., Божко И. В. Электрический пробой электроположительных газов при температурах до 2000 К // Теплофизика высоких температур. - 1992. - Т. 30. - №2. - С. 223-229.

7. Sharaevsky V. N., Bozhko I. V. Development of ionization and transition to breakdown in argon at temperatures up to 2000 K

// XIX Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases: Contrib. Pap. - Belgrade, 1989. -Vol. 4. -P. 874-875.

8. Sharaevsky V.N., Bozhko I.V. Development of ionization and transition to breakdown in gases at temperatures up to 2500 K // XX Intern. Conf. in Phenomena in Ionized Gases: Contrib. Pap. - Il Ciocco (Barga, Italy), 1991. -Vol. 5. -P. 1035-1036.

9. Sharaevsky V.N., Bozhko I.V. Gases breakdown at temperatures up to 2500 K // 7th Intern. Symposium on High Voltage Engineering: Dresden, 1991. -Vol. 3. -P. 145-148.

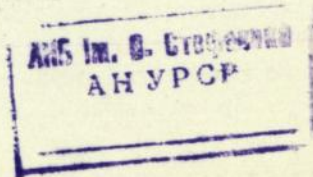


Подписано к печати 21.Х.1992 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная Усл.-печ. лист, 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.

Тираж 100. Заказ 1084. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.





U67731

AB 25.706

9.

31