

## ОБ АВТОРАХ

**Гизатуллин Фарит Абдулганевич**, профессор, зав. кафедрой электрооборудования ЛА и наземного транспорта УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1972), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА, элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 1994). Исследования и разработки в области систем зажигания двигателей ЛА, воспламенения горючих смесей искровыми разрядами, цифровой диагностической аппаратуры для контроля параметров быстропротекающих импульсных процессов.



**Байбурин Искандар Хамитович**, аспирант той же кафедры. Дипл. инженер по электрооборудованию ЛА (УГАТУ, 1997). Готовит диссертацию по проектированию систем зажигания газотурбинных двигателей.

УДК 621.43.04.002.5.001

## АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ АЗ2 СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

**В. М. КУЛЯПИН**

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ  
Тел: (3472) 23 77 43

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов коммутации на высотах до 200 км. Определены особенности работы аппаратов и параметры катодных процессов электрических разрядов. Дано обоснование конструкции аппаратов защиты Аз2

*Короткое замыкание; коммутация; аппарат; защита; кабина; космический корабль; разрежение; катодные процессы*

### ВВЕДЕНИЕ

Рост требований, предъявляемых к современным летательным аппаратам по высоте и скорости полета, ставит ряд сложных задач по обеспечению надежного функционирования элементов и устройств систем управления при изменении условий работы на всех режимах полета, включая аварийные. Статья посвящена рассмотрению процессов коммутации в аппаратах защиты систем управления космического корабля. Короткое замыкание представляет тяжелый режим, и защита от коротких замыканий является обязательным видом защит практически всех систем, чтобы предупредить тяжелые последствия, к которым могут привести возможные аварийные режимы, связанные с отказом отдельных элементов систем управления. Об этом свидетельствует гибель трех американских космонавтов из-за короткого замыкания в системе. Кроме обычных требований, предъявляемых к авиационному оборудованию, к аппаратам защиты космических кораблей предъявляются специальные требования по обеспечению работы при изменении давления окружающей среды от атмосферного до  $10^{-4}$  Па. Необходимо выбрать метод надежного отключения токов короткого за-

мыкания. В статье разработана математическая модель и проведено моделирование процессов в области катодного падения потенциала, установлены источники энергии взаимосвязанных теплофизических и эмиссионных процессов, исследованы методы гашения электрических разрядов в вакууме и разработаны рекомендации по созданию аппаратов защиты и управления систем электропитания кабин космических кораблей.

Аномальное движение электрического разряда в вакууме открыто в начале века Штарком и Вейнтраубом и наблюдалось на всех подвергнутых испытанию металлах. Сущность явления заключается в том, что наблюдаемое при атмосферном давлении движение разряда под воздействием внешнего магнитного поля при повышении разрежения замедляется, а затем происходит изменение направления движения на обратное ожидаемому согласно правилу Ампера. Увеличение давления во всех случаях приводит к переходу направления движения в соответствии с законом Ампера.

Отсутствие экспериментальных исследований и слабая проработка теоретических вопросов не позволяли дать практические рекомендации по созданию аппаратов защиты для кабин космических кораблей [1].

### 1. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ НА КАТОДЕ

Проведено математическое моделирование на основе совместного рассмотрения эмиссионных и теплофизических процессов в катодном пятне. В решение введены только экспериментальные значения работы выхода  $\varphi$ , катодное падение потенциала  $u_k$  и теплофизические постоянные катода — скрытая теплота парообразования  $L_q$  и плавления  $L$ , удельная теплоемкость  $s$  и температура плавления  $T_m$ . Катодные процессы рассмотрены в динамике с учетом инерционности теплофизических процессов.

Уравнение баланса энергии в элементарном катодном пятне имеет вид

$$q_i + \frac{q_V}{2} y = q_0 + q_e + q_r. \quad (1)$$

В уравнении учитываются источники энергии — бомбардировка катода ионным током  $q_i$ , резистивный нагрев расплавленной зоны металла  $q_V$  и пути рассеяния энергии — термоэмиссия электронов  $q_e$ , испарение, плавление и теплопередача в катод  $q_0$ . Радиационные потери  $q_r$  в рассматриваемом диапазоне температур не учитываются.

Тепловой поток бомбардировки катода ионным током равен

$$q_i = \mu(1 + \eta + \nu)\psi j_e U_k, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент аккомодации;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий влияние ионной температуры плазмы;  $\nu$  — коэффициент, учитывающий энергию возбуждения рекомбинированного иона.

Соотношение между ионной  $j_i$  и электронной  $j_e$  составляющими тока разряда  $\psi = j_i/j_e$  определяется уравнением Маккоуна

$$\psi = \left(\frac{m_i}{m_e}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{E^2}{7,57 \cdot 10^5 \cdot U_k^{\frac{1}{2}} j_e}\right), \quad (3)$$

где  $m_i/m_e$  — отношение массы иона к массе электрона;  $E$  — напряженность поля у катода.

Плотность тока электронной эмиссии  $j_e$  для высокотемпературной области катодного пятна описывается уравнением термоавтоэлектронной эмиссии Мерфи и Гуда

$$j_e = 120 T_0^2 \frac{1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} / T_0}{\sin(1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} / T_0)} \times \exp\left(\frac{4,39 E^{1/2} - 1,16 \cdot 10^4 \varphi}{T_0}\right), \quad (4)$$

где  $T_0$  — температура поверхности катодного пятна.

Тепловой поток резистивного нагрева расплавленной зоны металла, отнесенный к единице площади катодного пятна, равен

$$q_V = 0,48 \left(\frac{2\pi}{3} \cdot r_k\right) \frac{j^2}{\sigma}; \quad q_V = 0,48 \frac{2\pi j^2}{3\sigma} y, \quad (5)$$

где  $\sigma = \sigma_m / (1 + \frac{2}{3} \alpha_m (T_0 - T))$  — электропроводность катода;  $\sigma_m$  — электропроводность при температуре плавления;  $\alpha_m$  — температурный коэффициент;  $j = j_e + j_i = (1 + \psi) j_e$  — плотность тока в катодном пятне.

### 2. ПЛАВЛЕНИЕ И ИСПАРЕНИЕ МАТЕРИАЛА КАТОДА

Глубина плавления  $y$  определена из решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом плавления и испарения материала катода [2]. Математическая модель нелинейной задачи состоит из уравнений в частных производных и краевых условий. Задавая профили температур для жидкой и твердой фаз, получаем дифференциальное уравнение относительно величины расплавленной зоны

$$y' = f(t)y^n + g(t)y + h(t), \quad (6)$$

где  $y$  — величина расплавленной зоны;  $f(t)$  — температуропроводность;  $g(t)$  и  $h(t)$  учитывают действие внутренних и внешних источников.

На основе интегрального метода задача сводится к модели, позволяющей найти решение в замкнутой аналитической форме. Решение уравнения [3]

$$y = \left[\frac{h(t)}{f(t)}\right]^{\frac{1}{n}} \cdot U(t), \quad (7)$$

где функция  $U(t)$  определяется соотношением

$$\int \frac{dU}{U^n - \gamma U + 1} + C = \int \left[\frac{f(t)}{h(t)}\right]^{\frac{1}{n}} h(t) dt. \quad (8)$$

Постоянная  $\gamma$  определяется из решения линейного уравнения

$$z' - g(t)z = \gamma h(t),$$

т. е.

$$z = \left[\frac{h(t)}{f(t)}\right]^{\frac{1}{n}} = \exp \int g(t) dt \times \left[ \beta + \gamma \int h(t) \exp - \int g(t) dt dt \right].$$

Для случая действия поверхностного теплового потока  $q_i(t)$  исходная система дифференциальных уравнений и краевых условий имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} = 0; \quad X_0 \leq x \leq X; \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial x^2} - \frac{1}{a_2} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} = 0; \quad X \leq x; \quad (10)$$

$$\vartheta_1(X, t) = \vartheta_2(X, t); \quad (11)$$

$$q_0(t) + \lambda_1 \left( \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} \right)_{x=X_0} = [L_0 + c_1 (T_0 - T_m)] \rho \frac{dX_0}{dt}; \quad (12)$$

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} \right)_{x=X} = \lambda_2 \left( \frac{\partial \vartheta_2}{\partial x} \right)_{x=X} + L\rho \frac{dX}{dt}; \quad (13)$$

$$\vartheta_2(x, 0) = T; \quad \vartheta_2(\infty, t) = T. \quad (14)$$

$$q_i(t) + \lambda_1 \left( \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} \right)_{x=X_0} = [L_0 + c_1 (T_0 - T_m)] \times \sqrt{\frac{M}{T_0}} \exp 2,3026 \left( A - \frac{B}{T_0} - 4,234 \right). \quad (15)$$

Решение уравнения (6)

$$U - \ln(1 + U) = \frac{q_0^2 t}{\rho \varepsilon [L_0 + c(T_0 - T_m)]}. \quad (16)$$

Время в относительных единицах

$$t^* = \frac{q_0^2 t}{\rho \varepsilon [L_0 + c(T_0 - T_m)]}. \quad (17)$$

Время до начала испарения

$$t_0^* = 2 \left[ \frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + L + c(T_0 - T)} \right]^2. \quad (18)$$

Время стабилизации процесса фазовых превращений  $t^* = 2$ .

Тепловой поток, отводимый термоэмиссией электронов, равен

$$q_e = (\varphi - 3,8 \cdot 10^{-4} E^{1/2} + 1,724 \cdot 10^{-4} T_0) j_e. \quad (19)$$

Температура катодного пятна в зависимости от плотности теплового потока определяется уравнением

$$q_0 = \frac{\lambda_1 (T_0 - T_m)}{y} + [L_0 + L + c(T_0 - T)] \times \sqrt{\frac{M}{T_0}} \exp \left( A - 4,234 - \frac{B}{T_0} \right), \quad (20)$$

где  $M$  — атомная масса материала катода;  $A, B$  — табулированные постоянные скорости испарения.

### 3. ПАРАМЕТРЫ КАТОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

По приведенным уравнениям рассчитаны значения параметров области катодного падения потенциала, удовлетворяющие условия равновесия теплофизических и эмиссионных процессов на катодах из серебра, меди, железа, никеля и золота. Определены параметры непосредственно перед взрывом точки привязки разряда и распадом элементарного катодного пятна: напряженность поля у катода  $E$ , температура катодного пятна  $T_0$ , плотность электронного тока  $j_e$ , тока ионов  $j_i$ , плотности тепловых потоков в катодном пятне ионов  $q_i$ , испарения и эмиссии электронов  $q_e$ , резистивного нагрева  $q_V$ , а также длительности существования элементарного катодного пятна  $t_b \max$  и частоты колебаний потенциала разряда  $f$ . Различные источники энергии в зависимости от времени определяют и различные типы разрядов: искровой, дуговой, тлеющий и т. д.

При напряженности  $E > 2,6 \cdot 10^7$  В/см длительность существования катодных пятен меньше времени нагрева поверхности до температуры  $T_0$  и начала испарения. Термоэмиссия электронов ослабляет поверхностный источник тепла, и, по-видимому, основным источником является энергия резистивного нагрева. Катодные процессы дискретны, для них характерны малая продолжительность существования и высокая плотность электронного тока  $j_e \geq 2,6 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Катодные процессы в этой области напряженности поля характерны для импульсных разрядов. Верхние значения параметров катодных процессов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры катодных процессов импульсных разрядов

Металл	$E \cdot 10^7$ , В/см	$j_e \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	$j_i \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	$t_b \cdot 10^{-9}$ , с
Серебро	3,43	10,0	1,0	1,13
Медь	2,43	6,36	0,775	94,2
Золото	2,33	1,75	0,285	250,5
Железо	2,93	4,75	0,86	0,6
Никель	2,83	2,34	0,807	1,7

Максимальная продолжительность процессов  $t_b^* = t_0^* = 9,1 \cdot 10^{-5}$  (в относительных единицах) равна времени нагрева поверхности катодного пятна до температуры  $T_0$  и начала испарения.

В области напряженности  $2 \cdot 10^7 \leq E \leq 2,6 \times 10^7$  В/см процессы также в основном определяются энергией поверхностного источника. Тепло Джоуля-Ленца не превышает 40% от суммарной величины. Однако резистивный нагрев расплавленной зоны приводит к тому, что с течением времени суммарный тепловой поток, подводимый к катоду, начинает превышать величину

Таблица 2  
 Параметры катодных процессов второго типа

Материал катода	$E \cdot 10^7, \text{В/см}$	$T_0, \text{К}$	$j_e \cdot 10^6, \text{А/см}^2$	$\psi = j_i/j_e$	$q_i \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$q_e \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$qv_y \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$j_i \cdot 10^6, \text{А/см}^2$	$t_b^*$	$T_b \cdot 10^{-6}, \text{с}$	$F_{\text{max}}, \text{кГц}$
Ag	2,5	3901,	2,11	0,22	9,67	6,51	0,84	0,47	0,03	3,78	265
Cu	51,5	3900,0	1,16	0,19	4,74	3,71	0,61	0,22	0,03	31,4	31,8
Au	1,4	4079,6	0,47	0,23	2,41	1,75	0,34	0,66	0,019	52,3	19
Fe	2,0	4392,1	1,73	0,24	8,61	6,16	1,40	0,43	0,051	0,34	2900
Ni	1,9	4504,6	0,88	0,42	7,33	3,46	1,87	0,37	0,05	0,94	1060

Таблица 3  
 Параметры дискретных процессов

Материал катода	$E \cdot 10^7, \text{В/см}$	$T_0, \text{К}$	$j_e \cdot 10^6, \text{А/см}^2$	$\psi = j_i/j_e$	$q_i \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$q_e \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$qv_y \cdot 10^6, \text{Вт/см}^2$	$j_i \cdot 10^6, \text{А/см}^2$	$T_{b \text{max}} \cdot 10^{-3}, \text{с}$	$F, \text{кГц}$
Ag	2,0	3895,3	1,02	0,30	6,17	3,34	1,11	0,30	0,20	4,9
Cu	1,0	3778,1	0,34	0,28	2,10	1,19	0,30	0,09	1,97	0,50
Au	0,90	3906,2	0,12	0,37	0,99	0,48	0,14	0,04	2,02	0,49
Fe	1,5	4300,0	0,71	0,33	4,82	2,69	0,98	0,24	0,003	39
Ni	1,4	4356,2	0,31	0,65	3,97	1,30	1,39	0,20	0,03	27,5

энергии, которую отводят термоэмиссия электронов и теплофизические процессы. Наличие избыточной энергии вызывает перегрев и взрыв расплавленного объема. Точка привязки разряда перемещается по поверхности катода. Следовательно, в этой области катодные процессы дискретны, вплоть до прекращения разряда в данной точке привязки определяется временем стабилизации расплавленной зоны  $t_b^* = 2$  (табл. 2). С увеличением напряженности время существования разряда снижается. При взрыве с катода удаляется и жидкий металл. Процессы характеризуются постоянством результирующего теплового потока и температуры.

При напряженности поля  $E \leq 2 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  на катоде устанавливается баланс энергии независимо от времени. Основным источником энергии является энергия бомбардировки катода ионным током. Резистивный нагрев незначителен и не влияет на параметры области катодного потенциала. Процессы стационарные, баланс энергии выполняется независимо от длительности разряда. Значения параметров приведены в табл. 3.

При напряженности поля  $E < 2 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  процессы неподвижны, значения представлены в табл. 4.

Метод исследования теплофизических процессов плавления и испарения при воздействии импульсов излучения высокой плотности включен в монографию [4].

Таблица 4  
 Параметры стационарных процессов

Материал катода	$E \cdot 10^7, \text{В/см}$	$j_e \cdot 10^3, \text{А/см}^2$	$j_i \cdot 10^3, \text{А/см}^2$
Ag	0,6	2,697	2,5
Cu	0,275	3,65	7,6
Au	0,4	6,0	8,7
Fe	0,6	25,4	35,5
Ni	1,1	87,0	133

#### 4. ОБРАТНОЕ ДВИЖЕНИЕ РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ

Объяснению механизма обратного движения разряда в вакууме посвящено более сорока работ. Существующие точки зрения и теории обратного движения по характеру постановки задачи разбиваются на две группы. К первой относятся теории, объясняющие обратное движение воздействием внешнего магнитного поля на заряженные частицы непосредственно в катодной области разряда. Ко второй группе относятся теории, связы-

вающие движение катодного пятна в поверхностном слое самого катода.

Проведенные исследования позволили объяснить механизм обратного движения электрического разряда в вакууме. Исходя из проведенного математического моделирования получено, что причиной движения является отклонение внешним полем заряженных частиц в катодной области разряда. А инверсия движения происходит вследствие перераспределения пятен с изменением разрежения. В разрядах при атмосферном давлении подвижность ионов мала и процессы протекают при больших напряженностях поля у катода. С понижением давления увеличивается подвижность ионов, что приводит к уменьшению напряженности поля. Как видно из результатов расчетов, доля ионного тока начинает возрастать. В момент, когда плотности ионного и электронного тока равны, разряд неподвижен. Дальнейшее увеличение разрежения приводит к снижению напряженности, плотность ионного тока превышает плотность тока электронов. При этом в полном соответствии с законами электродинамики разряд под воздействием внешнего магнитного поля начинает перемещаться в обратную сторону. И гашение разряда магнитным полем применять нельзя.

В отличие от предыдущих исследований в работе получены численные значения параметров катодной области для различных разрядов, в том числе и таких, которые невозможно определить экспериментально: напряженность поля, плотность тока ионов и электронов. Это позволило провести сравнение расчетов с экспериментами по параметрам, которые возможно измерить.

Экспериментальные исследования процессов коммутации проводились в барокамере с разрежением до  $10^{-5}$  Па. Межэлектродный зазор выступал дистанционно шаговым двигателем с шагом 1 мк. В результате экспериментов установлено значительное снижение отключающей способности и определены предельные отключаемые токи и длительность процессов коммутации цепей управления в диапазоне высот до 200 км.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений скорости электрической эрозии: общей, а также в жидкой и паровой фазе. Исследованы функции распределения и средние значения частоты высокочастотных колебаний потенциала разряда. Проведено сравнение влияния теоретических и экспериментальных значений тока на пятно различных разрядов, в том числе импульсных разрядов в вакууме микросекундной и наносекундной длительности. Резуль-

таты расчетов хорошо согласуются с экспериментом [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана действенность применения математического моделирования при исследовании многопараметрических взаимосвязанных процессов. Вычислительный эксперимент позволил вскрыть основные закономерности развития процессов, исследовать устойчивость, изучить картину взрыва и гибели точек привязки разряда. Доказана необходимость применения статистических методов при исследовании электрических разрядов.

Следовательно, надежное отключение цепей управления в кабинах космических кораблей может обеспечить лишь катодное гашение. Результаты исследований использованы при обосновании конструкции, разработке и изготовлении аппаратов защиты Аз2 на номинальные токи от 2 до 50 А. Аппараты надежно работают во всем диапазоне изменения давлений от атмосферного до космического вакуума.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электроснабжение** летательных аппаратов / В. А. Балагуров, В. А. Беседин и др.; Под ред. Н. Т. Коробана. М.: Машиностроение, 1975. 536 с.
2. **Куляпин В. М.** Некоторые задачи теплопроводности с фазовыми превращениями // Инж.-физ. ж. 1971. Т.20, № 3. С. 497–499.
3. **Камке Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. 576 с.
4. **Коздоба Л. А.** Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Наука, 1975. 227 с.
5. **Месяц Г. А., Проскуровский Д. И.** Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Куляпин Владислав Максимилианович**, доцент кафедры электрооборудования ЛА и наземного транспорта УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (Новосиб. электротех. ин-т, 1959), канд. техн. наук по технической кибернетике (там же, 1970). Исследования в области элементов и устройств систем управления с электрическими разрядами.