

УДК 621.43.04.002.5.001

В. М. КУЛЯПИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ЗАЖИГАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОРАЗОВОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «БУРАН»

Рассматриваются проблемы построения электрических устройства зажигания ракетных двигателей систем управления многоразового космического аппарата «Буран». Обсуждается область устойчивого зажигания, параметры электрических импульсных разрядов, функции распределения энергии разряда. Электрический разряд; устройства зажигания; критерии устойчивости; практическая реализация

При создании многоразовых космических аппаратов необходимо решить комплекс проблем, связанных с обеспечением управления аппаратом на всех этапах полета. Система управления космическим аппаратом включает бортовой вычислительный комплекс и исполнительный орган — объединенную двигательную установку реактивной системы управления (ОДУ РСУ), включающую несколько десятков жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ). Применение несамовоспламеняющегося топлива выдвинуло задачу создания устройств зажигания двигателей РСУ. Устройства зажигания ЖРД МТ, в отличие от систем зажигания авиационных газотурбинных двигателей, должны работать в условиях изменения разрежения в широких пределах и невесомости, обеспечить стабильные динамические характеристики в повторно-кратковременном режиме. Идею применения электрических устройств зажигания в ракетных двигателях систем управления предложил акад. В. П. Глушко [1], однако это направление не развивалось в связи с применением самовоспламеняющегося топлива. Отсутствие аналогов, незавершенность математической теории электрического зажигания не позволяли создать устройства, пригодные к применению в ракетно-космической технике.

1. ОБЛАСТЬ УСТОЙЧИВОГО ЗАЖИГАНИЯ

Зажигание — процесс инициирования воспламенения [2]. Развитие теории горения и взрыва — самостоятельной большой области математической физики — тесно связано с

трудами акад. Н. Н. Семенова и его школы [3]. В настоящей работе на основании решения задач нестационарной теплопроводности с фазовыми превращениями и уносом массы испарением [4, 5] определены критерии устойчивости зажигания и область устойчивого зажигания двигателей РСУ. Для значений коэффициентов избытка окислителя $\alpha = 0,4 \div 4$ по теплофизическим и термодинамическим свойствам продуктов сгорания [6] установлена температура пламени T_δ и теплота сгорания топлива H_α . Результаты расчетов для «богатых» смесей представлены в табл. 1, где T_0 — температура поверхности капли; q_i — плотность потока поверхностного источника и в момент начала испарения $q_i(\bar{t}_0)$; q_0 — плотность потока, поступающего в каплю; χ — коэффициент теплового взаимодействия; q_V — плотность объемного тепловыделения. Для бедных смесей $\alpha = 1 \div 4$ расчеты проводятся аналогично.

Область устойчивого зажигания ограничена верхним $q_{i \max} = 1,73 \cdot 10^5$ Вт/см² и нижним $q_{i \min} = 2,33 \cdot 10^3$ Вт/см² значениями теплового потока и длительностью от 10^{-6} с при $\alpha = 1$ до 10^{-3} с при $\alpha = 0,4$.

2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

В связи с практическим применением электрических разрядов в науке и технике за последние годы достигнуты значительные успехи в области фундаментальных исследований электрического разряда. Результаты рассмотрения процессов фазовых превращений плавления и уноса массы парами при дей-

Таблица 1

Границы устойчивости зажигания топлива керосин-кислород

α	T_δ, K	T_0, K	$q_i, \text{Вт/см}^2$	$q_i(\bar{t}_0), \text{Вт/см}^2$	$q_0, \text{Вт/см}^2$	χ	$q_V, \text{Вт/см}^3$
1,0	3575	1037	$1,77 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^6$	$1,73 \cdot 10^5$	0,1637	$6,7 \cdot 10^8$
0,9	3590	942	$1,1 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^5$	$1,23 \cdot 10^5$	0,183	$1,9 \cdot 10^8$
0,8	3580	849	$6,2 \cdot 10^5$	$3,92 \cdot 10^5$	$8,14 \cdot 10^4$	0,208	$4,8 \cdot 10^7$
0,7	3520	754	$3,01 \cdot 10^5$	$1,98 \cdot 10^5$	$4,77 \cdot 10^4$	0,24	$9,75 \cdot 10^6$
0,6	3316	658	$1,18 \cdot 10^5$	$8,24 \cdot 10^4$	$2,36 \cdot 10^4$	0,286	$1,57 \cdot 10^6$
0,5	2900	562	$3,31 \cdot 10^4$	$2,56 \cdot 10^4$	$9,04 \cdot 10^3$	0,353	$1,85 \cdot 10^5$
0,4	2220	467	$5,08 \cdot 10^3$	$5,08 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^3$	0,459	$1,53 \cdot 10^4$

ствии поверхностных и объемных источников тепла позволяют провести совместное исследование элементарных процессов на границе плазмы электрического разряда и материала.

На основании экспериментальных исследований [7] после поджигания и образования слабоионизированной перемычки между электродами свечи разделяют три стадии развития канала импульсного разряда (рис. 1). На первой стадии I узкий канал радиусом $r = 0,1-0,2$ мм сильно разогревается.

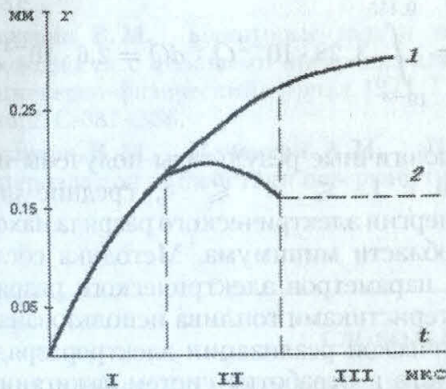


Рис. 1. Схема развития искрового канала

Затем на второй стадии II наблюдается образование ударной волны 1 и расширение светящегося канала 2. Ударная волна 1 продолжает двигаться с высокой скоростью, а канал разряда 2 в результате расширения охлаждается, что приводит к снижению радиуса разряда. На третьей стадии III канал разряда исчезает и восстанавливается исходное состояние межэлектродного промежутка.

Мощность в импульсном разряде по известной функции тока определяется выражением [8]

$$p(t) = \frac{g}{\tau^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{i^{\frac{4}{3}}}{t^{\frac{1}{3}}}, \quad (1)$$

где i — ток разряда с периодом τ ; t — время с начала разряда;

$$g = \left(\frac{2\zeta_1 \rho_0}{\pi \sigma^2} \right)^{\frac{1}{3}} l; \quad (2)$$

$$\zeta_1 = K_p [1 + (k_1 - 1)^{-1}];$$

K_p — коэффициент поршня; K_1 — эффективный показатель адиабаты (для воздуха $k_1 = 1,22$); ρ_0 — начальная плотность газа; l — длина разрядного промежутка; $\sigma = \beta \sigma'$ — удельная электропроводность плазмы в канале разряда; $\sigma' = 3 \cdot 10^3$ (Ом·м) $^{-1}$;

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{при } l \geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м;} \\ 0,5 \cdot 10^2 l & \text{при } 10^{-3} \leq l \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{cases}$$

Сопротивление канала разряда вблизи максимума тока равно [8]

$$R_{\min} \approx \frac{1,15g}{\tau^{2/3} t_m^{1/3} I_m^{2/3}},$$

где t_m — момент достижения максимального значения тока I_m ; τ — период колебаний тока разряда,

$$\tau = \frac{2\pi L_1}{[R_{\text{кр}}^2 + (R + R_3)^2]^{1/2}};$$

$R_{\text{кр}} = \sqrt{L_1/C}$ — критическое сопротивление контура; $R_3 \approx 1,3R_{\min}$ — эквивалентное сопротивление дуги, обеспечивающее при линеаризации то же потребление энергии, что и реальная дуга; R — активное сопротивление проводов.

Установлено [7], что процесс расширения разряда описывается уравнением $r_k = R_1 t^n$ и не зависит от емкости в пределах 0,02–26 мкФ. Для начальной стадии разряда $n = 1/2$, $R_1 = 1,41$ м/с $^{1/2}$.

Энергия за полупериод периодического разряда

$$Q_{\tau/2} = 0,45gI_m^{4/3} = 0,5\pi R_1 l q t^{3/2}. \quad (3)$$

Для аperiodического разряда

$$Q = 0,23g \frac{t_p}{t_f} I_m^{4/3} = \frac{t_p \pi R_1 l}{4t_f} q t^{3/2}, \quad (4)$$

где t_p — время протекания тока, но не более $4t_f$.

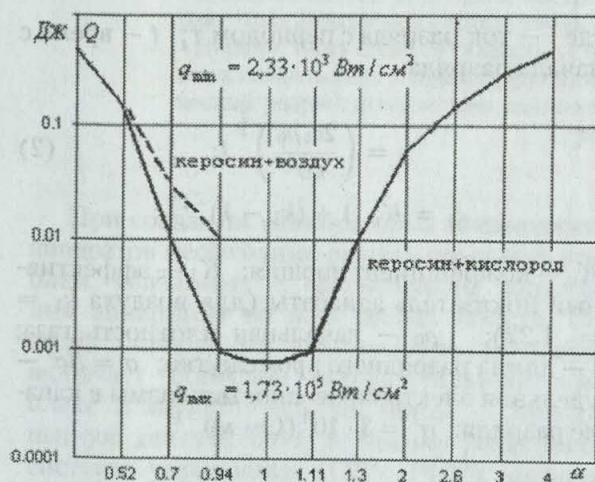


Рис. 2. Область устойчивого зажигания топлива керосин-кислород при различных коэффициентах избытка окислителя

Таблица 2

Границы устойчивости зажигания топлива керосин-кислород

α	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Q , Дж	0,455	0,165	0,043	0,011	0,004	0,0017	0,0008
α	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Q , Дж	0,001	0,004	0,008	0,010	0,017	0,022	0,029
α	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Q , Дж	0,038	0,048	0,058	0,100	0,275	0,400	0,455

Зависимость минимальной энергии разряда для зажигания смеси керосин-кислород в функции коэффициента избытка окислителя α представлена на рис. 2 и в табл. 2. При расчете энергии электрического разряда использованы данные табл. 1 (α , T_δ , T_0 , t_0 , $q_i(t_0)$). Для сравнения на график пунктиром нанесены экспериментальные исследования энергии зажигания смеси керосин-воздух [9].

3. ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РАЗРЯДА

Из расчетов видно, что оптимальные условия электрического зажигания получаются

при стехиометрическом составе смеси. Однако в реальных системах положение капли в зоне разряда является случайной величиной. Поэтому характеристики зажигания необходимо определять как средние значения для возможных значений коэффициента избытка окислителя. Для «богатых» смесей в диапазоне изменения $0,4 \leq \alpha \leq 1$ зависимость энергии электрического разряда от α аппроксимируется уравнением

$$Q = 10^{-3} \alpha^{-7}. \quad (5)$$

Для равномерного распределения коэффициента избытка окислителя смесей $0,4 \leq \alpha \leq 1$ с плотностью распределения $g_\alpha = 1/\alpha$, $g_\alpha = 1,67$, средним значением $M_\alpha = 0,7$; дисперсией $D(\alpha) = 3 \cdot 10^{-2}$ плотность распределения энергии разряда определяется уравнением

$$g_Q(Q) = 3,28 \cdot 10^{-2} Q^{-9/7}. \quad (6)$$

Среднее значение энергии разряда для диапазона $10^{-3} \leq Q \leq 0,455$ Дж

$$M_Q = \int_{10^{-3}}^{0,455} 3,28 \cdot 10^{-2} Q^{16/7} dQ = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Аналогичные результаты получены и для смесей с $1 \leq \alpha \leq 4$, средние значения энергии электрического разряда находятся в области минимума. Методика согласования параметров электрического разряда с характеристиками топлива использована при практической реализации электроразрядных устройств и отработке систем зажигания на огневых стендах. Результаты работы позволяют исследовать и аварийные режимы работы, повысить безопасность полетов, снизить массу и габариты, уменьшить энергопотребление при разработке и проектировании экспериментальных изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование новейших достижений в области теории воздействия электрических разрядов на материал в электротехнических системах космических аппаратов позволяет проводить изучение системных процессов в штатных и аварийных ситуациях. Разработанная обобщенная математическая модель процессов фазовых превращений плавления, испарения, воспламенения, начинающихся в твердой или жидкой фазе, протекающих под

воздействием энергии электрических разрядов, позволила провести анализ устойчивости зажигания как начальной фазы воспламенения, определить границы устойчивости, параметры электрических разрядов, обеспечивающих совместимость с параметрами топлива в ракетных двигателях малой тяги реактивной системы управления многоразового космического аппарата «Буран». Установлено, что для устройств зажигания ракетных двигателей определяющим требованием, наряду с обеспечением воспламеняющей способности, является исключение аварийных ситуаций вследствие металлизации или коксования межэлектродной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 138582 (СССР). Способ автоматического зажигания в реактивном двигателе / В. П. Глушко. Заявл. 08.12.1933.
2. Глушко В. П. Космонавтика. Маленькая энциклопедия. М.: Сов. Энциклопедия, 1970. 592 с.
3. Зельдович Я. Б., Баренблат Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
4. Куляпин В. М. Некоторые задачи теплопроводности с фазовыми превращениями // Инженерно-физический журнал. 1971. Т. XXI, вып. 2. С. 381–386.
5. Куляпин В. М., Печенкин А. И. Нагрев материала при воздействии поверхностного и

внутреннего источников тепла // Инженерно-физический журнал. 1979. Т. 37, № 3. Деп. № 710-79.

6. Алемасов В. Е., Дрегалли А. Ф., Тишин А. П. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под науч. рук. акад. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР, 1972. Т. 2: Топлива на основе кислорода. 489 с.
7. Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 1 – 520 с., Т. 2 – 352 с.
8. Романенко И. Н. К расчету энергии, выделяемой газоразрядным промежутком при разряде конденсатора // Электричество. 1979. № 5. С. 71–72.
9. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 566 с.

ОБ АВТОРЕ

Куляпин Владислав Максимилианович, профессор каф. электрооборудования ЛА УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (Новосиб. электротехн. ин-т, 1959). Канд. техн. наук по технической кибернетике (там же, 1970). Докторск. дис. по элементам и устройствам систем управления (УГАТУ, 2002). Исследования в области элементов и устройств систем управления с электрическими разрядами.



Разнов

СЛОВО О НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Честь для меня дороже всего, даже успеха. К. Э. Циолковский.

Самое лучшее из всех доказательств есть опыт. Бэкон.

Большой подозрительностью отличается лишь тот, кто мало знает. Бэкон.

Беги от учений таких умозрителей, доводы [которых] не подкреплены опытом!

Леонардо да Винчи.

Все наши теории — это не что иное, как обобщение опыта, наблюдаемых фактов.

В. А. Амбарцумян.

Один опыт я ставлю выше, чем тысячу мнений, рожденных только воображением.

М. В. Ломоносов.

Философия есть любовь к мудрости. Анахт.

Главная польза математики заключается в применении ее для объяснения природы. Максвелл.

Нормальное развитие научной мысли невозможно без столкновения мнений, без споров и дискуссий. И. И. Артоболевский.

Студент — это не сосуд, который надо заполнить знаниями, а факел, который

нужно зажечь. Л. А. Арцимович.

[Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты. Кн. 2. М.: Знание, 1981.]