

## Влияние особенностей разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей газотурбинных двигателей на характеристики плазменного выброса

Ф. А. Гизатуллин, Р. М. Салихов

*Методом высокоскоростного фотографирования исследуется влияние конструктивных особенностей разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей на пространственно-временные характеристики плазменного выброса. С целью уточнения приоритетного влияния различных факторов на характер движения плазмы в разрядной камере свечи изготовлены макеты стреляющих свечей, усиливающие воздействие отдельных факторов. В результате исследований установлено, что основное влияние на траекторию движения плазмы разряда оказывает совместное действие кумулятивного эффекта и отражение плазмы от стенки разрядной камеры, противоположной месту образования разряда.*

*Ключевые слова:* стреляющая полупроводниковая свеча, разрядная камера, параметры плазменного выброса.

### Введение

Стреляющие полупроводниковые свечи используются при непосредственном способе воспламенения топливовоздушных смесей в камерах сгорания современных газотурбинных двигателей. Анализ последовательных стадий разработок и доработок основных типов серийных стреляющих свечей, их конструктивных особенностей и результатов исследований показывает, что проведенные работы позволяют сделать лишь частные выводы о влиянии отдельных конструктивных параметров на воспламеняющую способность свечей. Другими словами, целенаправленных исследований механизма развития разряда, основных закономерностей процесса выброса плазмы из разрядных камер свечей не проводилось.

Представляется, что основные направления исследований методов повышения эффективности стреляющих свечей должны заключаться в установлении взаимосвязи между конструктивными параметрами свечей, определяющими пространственно-временные характеристики плазменного выброса из разрядных камер, и воспламеняющей способностью.

С точки зрения возможных методов экспериментального исследования быстротекущих импульсных разрядных процессов необходимо отметить работы [1–9]. В [2] использовался метод высокоскоростной фотосъемки в камере, содержащей окна из оптического стекла; в работе [5] при исследовании условий воспламенения систем «жидкость–пузырьки газа» ударной волной, создаваемой источником зажигания, причем оптическая съемка велась барабанным фоторегистратором через окна из стекла в исследуемой камере.

Целью данной работы является исследование влияния конструктивных особенностей стреляющих полупроводниковых свечей на характеристики плазменного выброса из разрядных камер.

### Экспериментальные исследования

На характер движения плазмы в разрядной камере свечи наряду с кумулятивным эффектом могут оказывать влияние следующие процессы:

- взаимодействие электромагнитного поля и движения, электродинамические силы, сопровождающие процесс образования ударной волны и влияющие на траекторию движения плазмы;
- отражение ударной волны от стенки разрядной камеры;
- зависимость выделяемой энергии разряда во времени;
- воспламенение и горение смеси.

Для уточнения приоритетного влияния указанных процессов на закономерности движения плазмы в разрядной камере исследовались про-

---

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, профессор, д.т.н.  
Салихов Ренат Мунирович, доцент, к.т.н.  
Уфимский государственный авиационный технический университет.  
Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.  
E-mail: texprom@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2017 г.

странственно-временные характеристики плазменного выброса в макетах стреляющих свечей с окном из оргстекла. Макеты свечей, аналогичные макету, показанному на рис. 1, имели сменные разрядные камеры, варианты которых отличались следующими характерными особенностями:

1. Стенки разрядной камеры выполнялись из диэлектрического материала с целью ослабления действия электродинамических сил. При этом разрядный ток протекает между электродами только у основания разрядной камеры.

2. Разрядная камера выполнялась с переменным диаметром, увеличивающимся к выходу. Этот вариант исполнения камеры предполагал изменить траекторию движения плазмы в случае, если имеет место отражение плазмы от стенки камеры, противоположной месту образования разряда в искровом зазоре свечи.

3. Поверхность полупроводника располагалась перпендикулярно оси разрядной камеры. Такое исполнение должно было полностью устранить отражение плазмы от стенки. (В остальных вариантах разрядных камер, кроме пятого поверхность полупроводника располагалась под углом к оси камеры).

4. Для увеличения плотности тока вблизи стенок разрядной камеры и повышения тем самым эффекта действия электродинамических сил на плазму разряда, металлические стенки разрядной камеры выполнялись с минимальной толщиной. Металлические стенки камеры являются боковым электродом свечи, при выполнении стенок с минимальной толщиной плотность тока, который замыкается через электроды и плазму разряда, возрастает.

5. Разрядная камера имела переменный диаметр, уменьшающийся к выходу. Поверхность полупроводника располагалась, как и в третьем варианте, перпендикулярно оси камеры.

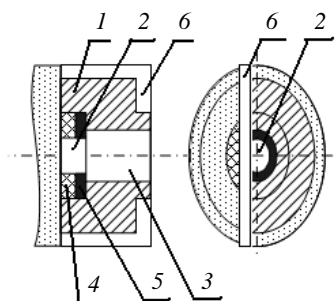


Рис. 1. Конструктивное исполнение макета свечи: 1 – боковой электрод, 2 – центральный электрод, 3 – разрядная камера, 4 – изолятор, 5 – полупроводник, 6 – органическое стекло прямоугольной формы.

Конструктивное исполнение макета свечи, показанное на рис. 1, соответствует варианту 3,

где поверхность полупроводника располагается перпендикулярно оси разрядной камеры.

Диаметр разрядных камер с параллельными стенками составлял 8 мм, глубина всех разрядных камер – 15 мм.

Полупроводниковый элемент в свечах обеспечивает снижение пробивного напряжения и практическую независимость пробивного напряжения от давления окружающей среды, т. е. известный закон Пашена на пробивное напряжение полупроводниковых свечей практически не распространяется. Начальная стадия пробоя развивается в полупроводнике, далее происходит взрывное испарение материала полупроводника, что и приводит к снижению пробивного напряжения между электродами. При наличии органического стекла разряд замыкается между центральным и боковым электродами у основания разрядной камеры. Разрядный ток в основной стадии разряда может достигать 1 кА [11].

Большая протяженность и длительность существования плазменного выброса обеспечивают более надежное воспламенение горючей смеси в высотных условиях запуска газотурбинных двигателей, когда граница зоны обратных потоков смеси в камерах сгорания, в которой условия для воспламенения смеси наиболее оптимальные, смещается относительно рабочего торца свечи к центру камеры сгорания. В этом случае плазменный выброс должен достичь границы зоны обратных потоков смеси [12].

Из известных методов исследований разрядных процессов определен метод высокоскоростного фотографирования плазменного выброса. Из существующего разнообразия установок для высокоскоростного фотографирования, основные сведения о которых даны в [10], наиболее приемлемой для цели исследования является сверхскоростная модернизированная фоторегистрирующая установка ВФУ-I, позволяющая осуществлять фотографирование быстротекущих процессов в режиме фотохронографа и кадровой макросъемки в видимой области спектра.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Оптическая картина развития однократного разряда регистрировалась на высокочувствительную пленку РФ-3 при работе высокоскоростной фоторегистрирующей установки ВФУ-I в режиме фотохронографа, то есть непрерывной временной развертки при скорости вращения зеркала до 60000 оборотов в минуту. Для синхронизации моментов начала разрядного процесса в свечах и начала фоторегистрации использовалась специальная схема синхронизации, обеспечивающая подачу на третий управляющий электрод разрядника FV высоковольтного импуль-

са после достижения двигателем ВФУ-1 номинальной скорости вращения и открытия электромагнитного затвора. (При этом накопительный конденсатор заряжается до напряжения, заведомо меньшего пробивного напряжения разрядника).

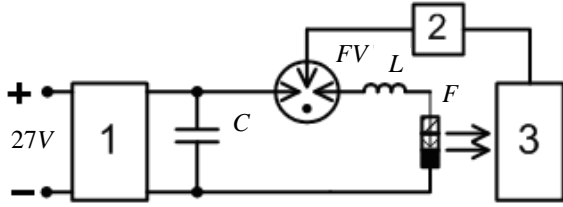


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: (1 – высоковольтный преобразователь, 2 – система управления ВФУ-1, 3 – ВФУ-1).

По фотоотпечаткам оптической картины развития разряда при работе установки ВФУ-1 в режиме фотохронографа фиксировались следующие параметры, характеризующие динамику развития разряда и плазменного выброса (см. рис. 3):

$t_1$  – время задержки выброса плазмы разряда из разрядной камеры свечи по отношению к моменту возникновения разряда. Для отметки на фотопленке момента начала разряда применялся следующий прием: с разрядника в зону выброса плазмы разряда волоконным световодом подавался сигнал. При этом на фотопленке плазменный выброс из свечи появляется с запаздыванием, равным времени пролета плазмой расстояния, равно- го высоте разрядной камеры свечи;

$t_2$  – длительность существования плазменного выброса;

$h$  – длина плазменного выброса;

$V$  – скорость движения плазмы в разрядной камере.

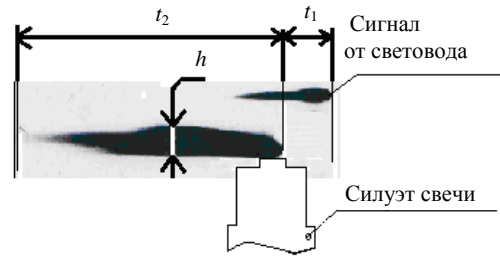


Рис. 3. Фотоотпечаток оптической картины развития разряда.

Указанные параметры регистрировались с максимальной погрешностью, не превышающей для  $t_1$  – 5 %,  $t_2$  – 10 %,  $h$  – 15 %,  $V$  – 5 %.

Для ясного понимания рис. 3 авторы подчеркивают, что длительность существования плазменного выброса  $t_2$  определялась по временной развертке плазменного выброса при работе ВФУ-1 в режиме фотохронографа.

Фоторегистрация процесса развития разряда проводилась последовательно в каждой из пяти разрядных камер макета свечи, причем при следующих параметрах разрядной цепи системы зажигания:  $C = 1,14$  мкФ,  $L = 0$ ; 32 мкГн. Результаты обработки фотограмм процесса движения плазмы разряда представлены в таблице.

Скорость движения плазмы в разрядной камере, определяемая как отношение глубины камеры к времени задержки выброса плазмы, меняется в пределах  $(2,03 \div 3,75) \times 10^3$  м/с при нулевой индуктивности разрядной цепи и в пределах  $(1,5 \div 1,87) \times 10^3$  м/с при индуктивности разрядной цепи, равной 32 мкГн. Этот результат является следствием уменьшения скорости нарастания тока в свече при увеличении индуктивности, что ведет к снижению мгновенной мощности разряда, определяющей динамику ударной волны [6].

Таблица

Параметры плазменного выброса из разрядных камер различного конструктивного исполнения

Параметры плазменного выброса	Вариант исполнения разрядных камер									
	1		2		3		4		5	
$L, \mu\text{H}$	0	32	0	32	0	32	0	32	0	32
$t_1, \mu\text{s}$	7,4	9,1	6,2	8,0	4,2	9,0	7,4	10	4,0	9,0
$h, \text{мм}$	4	8	5,6	6,0	5,5	8,6	4,5	5,5	7	8,3
$t_2, \mu\text{s}$	26	90	27	100	24	120	24	70	24	74
$V, 10^3 \text{ м/с}$	2,03	1,65	2,42	1,87	3,57	1,67	2,03	1,5	3,75	1,67

Длина плазменного выброса за рабочий торец макетов свечей варьируется в пределах 4÷8,6 мм и для всех вариантов исполнения разрядных камер коррелируется с изменением индуктивности разрядной цепи, причем с увеличением индуктивности длина плазменного выброса увеличивается. Этот результат, несмотря на снижение скорости

движения плазмы в разрядной камере с увеличением индуктивности, объясняется увеличением длительности искрового разряда и, соответственно, длительности существования плазменного выброса.

Сравнение результатов исследования первого и четвертого вариантов исполнения разрядных камер, которые должны были максимально осла-

бить и усилить действие электродинамических сил на процесс развития плазмы разряда, показало, что в обоих случаях траектория движения плазмы разряда остается практически неизменной, то есть заметного влияния электродинамических сил на траекторию движения плазмы не обнаружено.

Как и следовало ожидать, положение плазмы разряда не симметрично относительно оси разрядной камеры; плазма на выходе камеры смещается радиально в сторону, с которой возникает разряд в междуэлектродном зазоре, т. е. траектория движения плазмы не является прямолинейной. Это происходит во всех вариантах исполнения разрядных камер. В макете свечи с расширяющейся к выходу разрядной камерой так же, как и в прямом канале, траектория движения плазмы качественно не меняется и является практически прямолинейной. Эффект отражения плазмы от стенки в этих вариантах исполнения камер практически не проявляется.

Наибольший выброс плазмы с прямолинейной траекторией движения без осязательного смещения плазменного пятна относительно оси камеры наблюдается в камере с поверхностью полупроводника, расположенной перпендикулярно оси камеры и в камере с сужающимся выходом.

### Заключение

В работе методом высокоскоростного фотографирования исследовано влияние конструктивных особенностей разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей газотурбинных двигателей на пространственно-временные характеристики плазменного выброса. Из полученных результатов следует, что основное влияние на траекторию движения плазмы в разрядной камере

стреляющих полупроводниковых свечей оказывает кумулятивный эффект с некоторыми проявлениями отражения плазмы от стенки камеры, противоположной месту образования разряда. При этом воздействие электродинамических сил на динамику движения плазмы практически не проявляется.

Наибольший выброс плазмы разряда за рабочий торец свечи достигается при выполнении разрядной камеры с поверхностью полупроводника, расположенной перпендикулярно оси камеры, и в камере с сужающимся к выходу диаметром.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лапушкина Т. А., Ерофеев А. В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 5. С. 35.
2. Вейнберг Ф. Дж. // Авиационные и ракетные двигатели. 1978. № 10. С. 11.
3. Майоров Н. И., Федосеева И. К. // Физика горения и взрыва. 1988. № 3. С. 42.
4. Пинчук М. Э., Будин А. В., Кумкова И. И., Чусов А. Н. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 8. С. 10.
5. Сычев А. И. // Физика горения и взрыва. 1985. № 2. С. 130.
6. Гизатуллин Ф. А., Салихов Р. М., Каримова А. Г. // Авиационная промышленность. 2016. № 2. С. 14.
7. Gizatullin F. A., Zaitsev V. N., Velikzhanin I. A., Alimbekov L. I. // Measurement Techniques. 1992. Vol. 35. No. 6. P. 646
8. Gizatullin F. A., Salikhov R. M. // Russ. Engin. Res. 2018. Vol. 38. Issue 1. P. 13.  
<https://doi.org/10.3103/S1068798X18010112>
9. Глушинева А. В., Савельев А. С., Сон Э. Е., Терешонок Д. В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 5. С. 153.
10. Новицкий Л. А. Степанов Б. М. Фотометрия быстропротекающих процессов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983.
11. Балагуров В. А. Аппараты зажигания. – М.: Машиностроение, 1968.
12. Гизатуллин Ф. А. // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 56.

PACS: 52.80.-s

## Influence of the features of the discharge chambers of semiconductor glow plugs of gas turbine engines on characteristics of the plasma ejection

*F. A. Gizatullin and R. M. Salikhov*

Ufa State Aviation Technical University (USATU)  
12 K. Marx str., Ufa, 450008, Russia  
E-mail: texprom@yandex.ru

*Received November 22, 2017*

*The effect of structural features of discharge chambers of shooting semiconductor plugs on the spatio-temporal characteristics of plasma ejection is investigated using the method of high-speed photography. In order to clarify the priority influence of various factors on the nature of the motion of the plasma in*

*the spark chamber of the plug, models of shooting plugs are made that enhance the effect of individual factors. As a result of the research it was established that the main effect on the trajectory of the discharge plasma is exerted by the combined effect of the cumulative effect and the reflection of the plasma from the wall of the discharge chamber opposite the place of formation of the discharge*

*Keywords:* shooting semiconductor plug, discharge chamber, plasma emission parameters.

## REFERENCES

1. T. A. Lapushkina and A. V. Erofeev, *Tech. Phys. Lett.* **41** (5), 35 (2015).
2. F. Dzh. Vejnberg, *Aviacionnye i Raketnye Dvigateli*, No. 10, 11 (1978).
3. N. I. Majorov and I. K. Fedoseeva, *Fizika Goreniya i Vzryva*, No. 3, 42 (1988).
4. M. Eh. Pinchuk, A. V. Budin, I. I. Kumkova, and A. N. CHusov, *Tech. Phys. Lett.* **42** (8), 10 (2016).
5. A. I. Sychev, *Fizika Goreniya i Vzryva*, No. 2, 130 (1985).
6. F. A. Gizatullin, R. M. Salihov, and A. G. Karimova, *Aviacionnaya Promyshlennost'*, No. 2, 14 (2016).
7. F. A. Gizatullin, V. N. Zaitsev, I. A. Velikzhanin, and L. I. Alimbekov, *Measurement Techniques* **35** (6), 646 (1992).
8. F. A. Gizatullin and R. M. Salikhov, *Russ. Engin. Res.* **38** (1), 13 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068798X18010112>
9. A. V. Glushneva, A. S. Savelyev, Ye. E. Son, and D. V. Tereshonok, *Tech. Phys.* **85** (5), 153 (2015).
10. L. A. Novickij and B. M. Stepanov, *Photometry of Fast Processes: a Handbook*, (Mashinostroenie, Moscow, 1983) [in Russian].
11. V. A. Balagurov, *Ignition Apparatus* (Mashinostroenie, Moscow, 1968) [in Russian].
12. F. A. Gizatullin, *Aviacionnaya Promyshlennost'*, No. 1, 56 (2000).