

## О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Гизатуллин Ф.А.<sup>1</sup>, Газизов Д.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12), e-mail: [office@ugatu.su](mailto:office@ugatu.su)

---

Анализируется известная методика проектирования емкостных систем зажигания ГТД. На основе моделирования получено выражение для расчета времени задержки воспламенения смеси в функции скорости потока, скорости горения и периода следования импульсов зажигания. С применением результатов экспериментов оценено влияние энергии разрядов в свече и частоты следования разрядов на время задержки воспламенения в условиях постоянства потребляемой системой зажигания мощности. Получено выражение для определения критерия воспламеняющей способности системы зажигания с учетом реальных параметров в камере сгорания. Доказано, что воспламеняющую способность искровых разрядов можно оценивать по величине радиуса начального ядра пламени.

---

Ключевые слова: критерий воспламеняющей способности, время задержки воспламенения смеси, частота следования разрядных импульсов.

## METHODS TO IMPROVE DESIGN CAPACITIVE IGNITION SYSTEMS

Gizatullin F.A.<sup>1</sup>, Gazizov D.R.<sup>1</sup>

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia (450000, Republic of Bashkortostan, Ufa, K. Marksa st., 12), e-mail: [office@ugatu.su](mailto:office@ugatu.su)

---

Analyzes the known method of designing capacitive ignition systems GTE. By modeling the expression for calculating the ignition delay as a function of the mixture flow rate, burning rate and cycle time of ignition. With the application of the results of experiments evaluated the effect of the discharge energy in the candle and the repetition frequency of discharges on the ignition delay time in a constant power consumption of the ignition system. An expression is derived for determining its igniting ability based on actual parameters in the combustion chamber. Proved that sparks igniting ability can be assessed by the radius of the initial core of the flame.

---

Keywords: criterion igniting ability, ignition delay mixture frequency of discharge pulses.

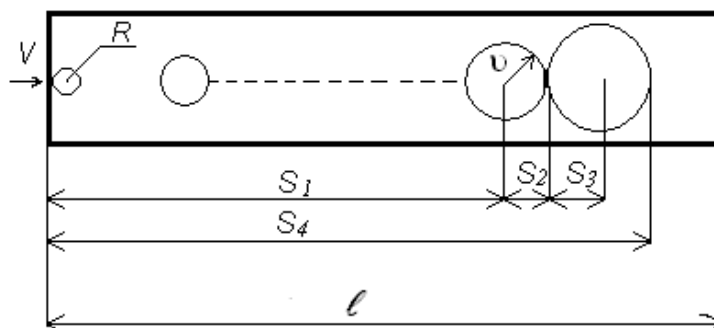
Известна методика проектирования емкостных систем зажигания ГТД [4]. В основе методики лежит математическая модель разрядных процессов в полупроводниковых свечах и установленный критерий воспламеняющей способности систем зажигания. Числовое значение критерия воспламеняющей способности определяется на основе эмпирических данных в зависимости от высоты и скорости полета, при которых необходимо произвести высотный запуск двигателя. По значению критерия воспламеняющей способности определяются параметры проектируемой системы зажигания. Методика предусматривает также вопросы, связанные с проведением допускового контроля разрядов в свечах, в основе которого лежит статистическая теория разрядных процессов. Допусковый контроль предназначен для определения вероятности попадания энергетических параметров разрядных процессов в пределах допусковых областей, которые определяются из условия надежного воспламенения смеси.

Эта методика проектирования является весьма упрощенной, ей присущи следующие недостатки:

- 1) при проектировании емкостных систем зажигания не оценивается время задержки воспламенения смеси от момента включения зажигания до момента образования устойчивого фронта пламени. Определение времени задержки воспламенения смеси необходимо для контроля и прогнозирования воспламеняющей способности систем зажигания. Время задержки воспламенения смеси не должно превышать определенной критической величины;
- 2) величина критерия воспламеняющей способности определяется без учета реальных параметров в камере сгорания, а именно давления, температуры и коэффициента избытка воздуха;
- 3) использованная в методике проектирования математическая модель не в полной мере учитывает сложную динамику разрядных процессов;
- 4) критерий воспламеняющей способности системы зажигания не связан функциональной зависимостью с геометрическими размерами начального ядра пламени, образованного искровым разрядом в свече;
- 5) при проектировании не предусмотрен выбор оптимального соотношения между накопленной энергией и частотой следования разрядных процессов при постоянстве потребляемой системой зажигания мощности.

В статье представлены результаты исследований, направленных на совершенствование методики проектирования, исключающей отмеченные выше недостатки.

На основе моделирования процесса образования и развития начального ядра пламени в идеализированном устройстве горения в виде прямого цилиндрического канала (рис. 1) получена система уравнений для определения времени задержки воспламенения смеси.



**Рис. 1.** Процесс развития и стабилизации пламени в устройстве горения.

$$S_1 = Vt;$$

(1)

$$S_2 = ut + R ;$$

(2)

$$S_3 = v(t + T) + R;$$

(3)

$$S_4 = V(t + T),$$

(4)

где  $T = \frac{1}{f}$  - период следования импульсов зажигания, образующихся в начале прямого

цилиндрического канала;

$f$  - частота искровых разрядов;

$V$  – скорость однородного потока смеси;

$v$  - скорость горения;

$R$  – радиус начального ядра пламени.

Время, по истечении которого происходит слияние границ отдельных ядер пламени (время задержки воспламенения), можно найти из условия:

$$S_1 + S_2 = S_4 - S_3.$$

(5)

Решая систему уравнений (1-5) для времени задержки воспламенения смеси, получаем:

$$t = \frac{T(V - v) - 2R}{2v}.$$

(6)

Очевидно, что слияние ядер пламени должно происходить в пределах длины канала  $l$ , то есть должно выполняться условие:

$$S_1 + S_2 \leq l.$$

(7)

Подставив (1) и (2) в (7) и с учетом выражения для времени задержки воспламенения (6), после преобразования получим:

$$\frac{T(V^2 - v^2)}{2U} - \frac{R(V + v)}{v} \leq l - R.$$

(8)

Если пренебречь радиусом начального ядра пламени  $R$ , создаваемого искровым разрядом в свече, по сравнению с длиной канала  $l$ , условие (8) преобразуется к виду:

$$f \geq \frac{V^2 - v}{l}.$$

(9)

Условие (9) совпадает с условием электроискровой стабилизации пламени, полученным в [1].

Анализ (6) показывает, что время задержки воспламенения смеси минимизируется при увеличении радиуса начального ядра пламени, создаваемого искровым разрядом и увеличении частоты следования разрядных импульсов. Радиус начального ядра пламени определяется энергетическим потенциалом искрового разряда; примем в первом приближении, что величина  $R$  пропорциональна энергии разрядов.

Применительно к емкостным системам зажигания, в основе которых - разряд предварительно заряженного конденсатора через коммутирующий разрядник на свечу, потребляемая мощность определяется выражением:

$$P = \frac{W_0 f}{\eta}.$$

(10)

где  $W_0 = \frac{CU_0^2}{2}$  - энергия накопительного конденсатора;

$\eta$  - коэффициент, учитывающий потери в зарядной цепи;

$C$  - емкость накопительного конденсатора;

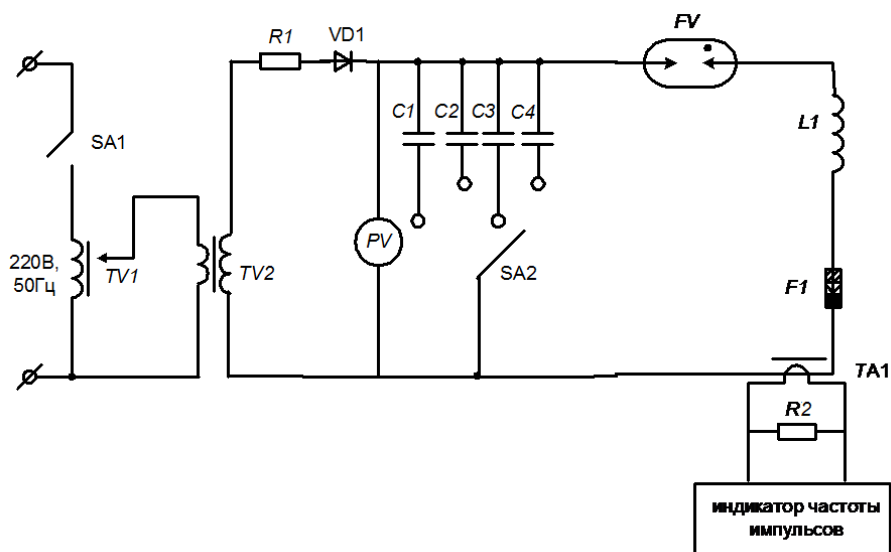
$U_0$  - напряжение заряда накопительного конденсатора.

Таким образом, с учетом принятого выше допущения при постоянстве потребляемой системой зажигания мощности радиус начального ядра пламени  $R$  и частота следования разрядов  $f$  обратно пропорциональны.

Данное обстоятельство дает возможность решать задачу определения оптимального соотношения между накопленной энергией  $W_0$  и частотой следования разрядов  $f$  с точки зрения минимизации времени задержки воспламенения, определяемого выражением (6).

Соотношения между параметрами  $R$  и  $f$  в условиях постоянства мощности системы зажигания определялись экспериментально. Схема экспериментального стенда показана на рис. 2. В основе стенда - макет емкостной системы зажигания с переменными параметрами. Изменение накопленной энергии осуществлялось за счет варьирования

емкости накопительных конденсаторов при постоянстве напряжения заряда конденсаторов, фиксируемых киловольтметром.



**Рис. 2.** Схема экспериментального стенда

Подстройка частоты следования разрядных импульсов для поддержания постоянства потребляемой мощности по соотношению (10) проводилась изменением напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Для имитации реальных условий в пусковых воспламенителях в искровой зазор полупроводниковой свечи подавалось дозированное количество авиационного керосина ТС-1 перед каждым включением макета системы зажигания. Радиус ядра пламени  $R$ , образованного искровым разрядом, фиксировался фотографически при соотношениях между параметрами  $W_0$  и  $f$ , показанных в таблице 1.

Таблица 1

Соотношения между параметрами  $W_0$  и  $f$  при зафиксированных значениях  $R$

$R$ , мм	$f$ , имп/с	$W_0$ , Дж
11	6,75	0,605
12,5	3,28	1,21
13,3	2,25	1,815
15	1,75	2,42
17	1,12	3,63
21	0,83	4,84
26,7	0,68	6,05
36,9	0,58	6,55

На рис. 3 показаны рассчитанные по формуле (6) значения времени задержки воспламенения при разных соотношениях между параметрами  $W_0(R)$  и  $f$ .

Таким образом, результаты моделирования показывают, что с точки зрения минимизации времени задержки воспламенения смеси при электроискровой стабилизации пламени, возможной

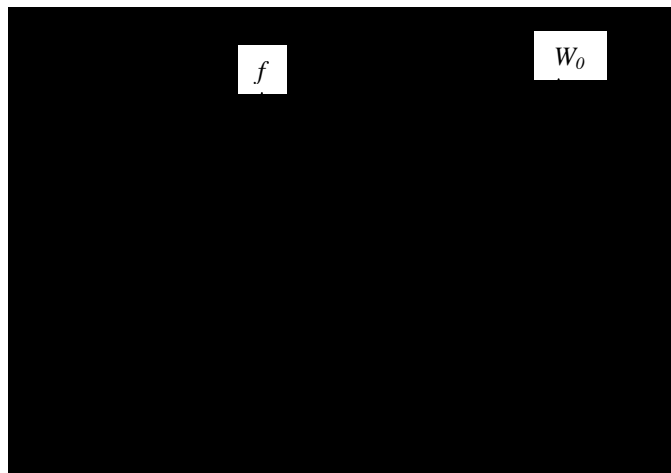


Рис. 3. Зависимость времени задержки воспламенения смеси от параметров системы зажигания.

в пусковых воспламенителях ГТД и в камерах сгорания в условиях высотного запуска двигателей, целесообразно увеличивать частоту следования разрядов в свечах при соответствующем снижении уровня накопленной энергии. Этот результат в качественном плане согласуется с данными о влиянии частоты следования разрядов в свечах на воспламеняющую способность емкостных систем зажигания, оцениваемую по конечному результату воспламенения смеси в камерах сгорания и пусковых воспламенителях [4; 8].

В работе [7] исследовалась воспламеняющая способность емкостных систем зажигания, которая оценивалась по величине пусковой характеристики воспламенителя с электроискровой стабилизацией пламени. В этой работе предложен один из возможных подходов к проектированию емкостных систем зажигания, учитывающий особенности процессов стабилизации пламени в пусковых воспламенителях камер сгорания ГТД, а также расчет параметров систем зажигания на основе критерия воспламеняющей способности. Суть подхода заключается в том, что значение емкости накопительного конденсатора системы зажигания определяется на основе заданного отношения критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания к длительности разряда  $K/t_u$ , причем это отношение находится по заданным значениям максимальной скорости потока смеси в камере, скорости распространения пламени, частоты разрядов, конструктивного параметра:

$$\frac{K}{t_u} = \frac{AV_{\max}}{\left[ \frac{1}{2f} \left( \frac{V_{\max}^2}{v} - v \right) - l \right] v}, \quad (11)$$

где  $V_{\max}$  – максимально допустимая скорость потока смеси, при которой еще возможна электроискровая стабилизация пламени,  $A$  – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства смеси,  $\ell$  – конструктивный параметр.

В известной методике проектирования емкостных систем зажигания критерий воспламеняющей способности системы зажигания, входящий в (11), рассматривается в виде [4]:

$$K = \frac{W_{св}}{I_m t_u W_0 f}$$

(12)

где  $W_{св}$  – энергия одиночного искрового разряда в свече зажигания;

$I_m$  – максимальное значение тока через свечу;

$t_u$  – длительность искровой стадии разрядов в свече;

$W_0$  – начальная энергия накопительного конденсатора.

В выражении (11) наиболее неопределенной величиной является скорость горения смеси  $v$ . Конкретизировать величину  $v$ , зависящую от давления  $P$ , температуры  $T$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  можно, используя результаты экспериментальных исследований горения в турбулентном потоке и аппроксимируя известные зависимости  $v=f(\alpha)$ ,  $v=f(P)$ ,  $v=f(T)$  [9].

Например, аппроксимируя экспериментальную зависимость  $v=f(P)$  и подставляя в (11), получим:

$$\frac{K}{t_u} = \frac{AV_{\max}}{\left[ \frac{1}{2f} \left( \frac{V_{\max}^2}{(0,28V + 4,25)P + (0,04V + 0,17)} - (0,28V + 4,25)P + (0,04V + 0,17) \right) - l \right]} \times \frac{1}{(0,28V + 4,25)P + (0,04V + 0,17)}$$

(13)

Аналогичные выражения получены и при подстановке в (11) зависимостей  $v=f(\alpha)$ ,  $v=f(T)$ .

Выражение (13) позволяет определить отношение  $\frac{K}{t_u}$  по заданным параметрам топливовоздушной смеси, конструктивному параметру камеры сгорания и заданной частоте следования искровых разрядов. С другой стороны, известное выражение для отношения  $\frac{K}{t_u}$  в функции параметров разрядной цепи имеет вид [2]:

$$\frac{K}{t_u} = \frac{\frac{U_{ост}}{(\delta^2 + \omega^2)} \left( \omega \left( 1 - \frac{U_{ост} \omega}{U_0 - b t_{пс} \omega_0} \right) (D_1 - D_2 + D_3) + D_4 \right)}{\frac{C U_0^2 U_u}{\delta^2} f \left( \ln \frac{U_u \omega_0}{U_{ост} \omega} \right)^2} ;$$

(14)

$$\text{где } D_1 = \frac{4\omega\delta(U_1 - U_2)}{\pi(\delta^2 + \omega^2)},$$

$$D_2 = \frac{8\delta\omega k}{\delta^2 + 9\omega^2},$$

$$D_3 = 2 \left( \frac{\omega}{\pi} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \ln \frac{U_u \omega_0}{U_{ост} \omega} \omega (U_1 - U_2) + U_2 \right),$$

$$D_4 = 2\omega(U_1 - U_2) \frac{\omega}{\pi} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \ln \frac{U_u \omega_0}{U_{ост} \omega},$$

где  $U_{ост}$  - остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда;  $U_1$  - начальное напряжение на свече;  $U_2$  - напряжение на свече в конце полупериода разрядного процесса;  $U_u$  - напряжение на накопительном конденсаторе к началу искровой стадии разряда;  $b$  - коэффициент, зависящий от свойств материала полупроводника;  $t_{пс}$  - длительность подготовительной стадии разряда в свече;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ;  $\delta = \frac{R}{2L}$ ;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Таким образом, определив отношение  $\frac{K}{t_u}$  по (13) и приравняв его к (14), можно найти

основные параметры емкостной системы зажигания, определив емкость накопительного конденсатора  $C$ .

В работе [3] рассмотрено влияние параметров разрядной цепи емкостной системы зажигания на величину критерия воспламеняющей способности. В результате математического моделирования было получено, что при росте емкости накопительного конденсатора величина критерия будет уменьшаться, при росте индуктивности разрядной цепи величина критерия будет также уменьшаться.

Анализ работы [5], где приводятся результаты создания обобщенной модели искрового воспламенения топливовоздушных смесей, показывает, что должна существовать зависимость между критерием воспламеняющей способности систем зажигания и радиусом начального ядра пламени, образованного искровым разрядом. Для подтверждения этого предположения проведены экспериментальные исследования на стенде, схема которого представлена на рис. 4. Стенд представляет собой макет емкостной системы зажигания с



регулируемыми параметрами. В ходе экспериментальных исследований фиксировались осциллограммы разрядного тока и падения напряжения в полупроводниковой свече при изменении индуктивности разрядной цепи; по осциллограммам определялись длительность разряда, максимальные значения тока через свечу, и методом графического перемножения и интегрирования определялась энергия искровых разрядов  $W_{св}$ . По найденным параметрам рассчитывался критерий воспламеняющей способности одиночного искрового разряда  $K_I$ , который в отличие от критерия воспламеняющей способности системы зажигания (12) записывается в виде [4]:

$$K_I = \frac{\int_0^{t_u} u i dt}{I_m t_u}.$$

(15)

С помощью фоторегистрирующей аппаратуры фиксировались также геометрические размеры начального ядра пламени, образованного искровым разрядом при подаче на свечу дозированного количества авиационного топлива.

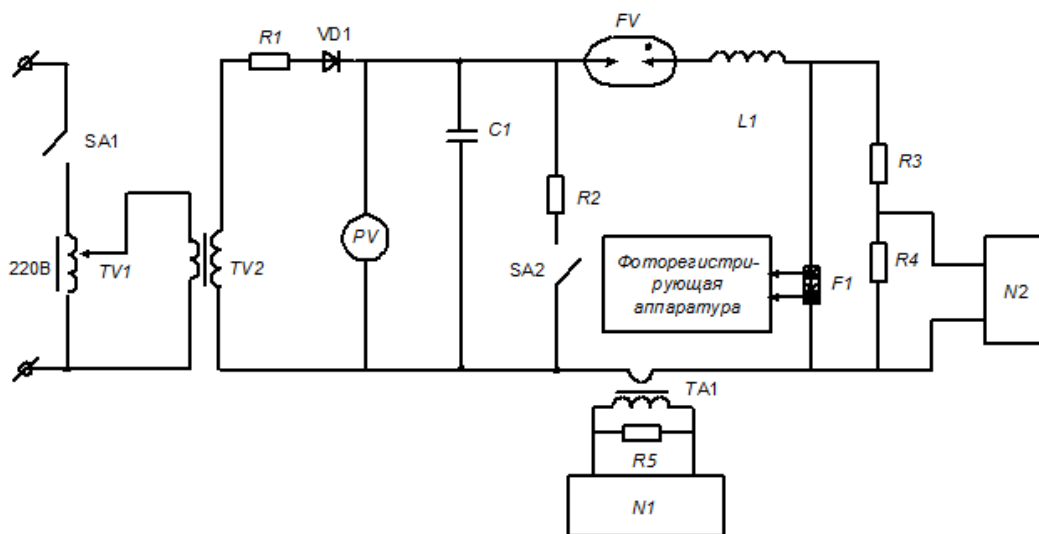


Рис. 4. Схема экспериментального стенда.

Результаты исследований сведены в таблицу 2. Получено, что с увеличением индуктивности разрядной цепи величина критерия воспламеняющей способности  $K$  закономерно снижается, а радиус начального ядра пламени увеличивается.

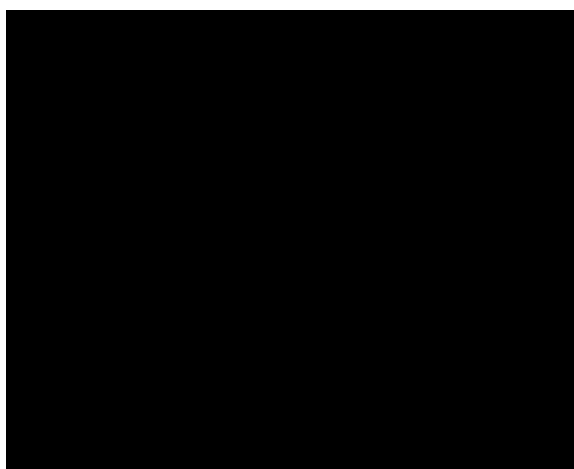
Таблица 2

Результаты исследований

$L, \text{мкГн}$	$I_m, \text{А}$	$t_{и}, \text{мкс}$	$W_{св}, \text{Дж}$	$K_I, \text{В}$	$R_0, \text{мм}$
------------------	-----------------	---------------------	---------------------	-----------------	------------------

19,7	345,2	40	0,19	0,032	11,7
32	318,6	50	0,20	0,027	13,3
129,1	238,9	95	0,30	0,018	15,7
139	132,8	120	0,49	0,009	18,0

Уменьшение критерия воспламеняющей способности, как следует из работы [5], сопровождается увеличением воспламеняющей способности системы зажигания. Действительно, радиус начального ядра пламени, ответственный за скорость развития процесса воспламенения, при уменьшении критерия воспламеняющей способности  $K$  возрастает. Взаимосвязь параметров  $K$  и  $R$  показана на рисунке 5.



**Рис. 5.** Взаимосвязь радиуса начального ядра пламени и критерия воспламеняющей способности одиночного искрового разряда в свече.

Таким образом, доказано, что воспламеняющую способность искровых разрядов можно оценивать по величине радиуса начального ядра пламени.

Представленные в статье результаты исследований являются основой для совершенствования известной методики проектирования емкостных систем зажигания.

### Список литературы

1. Вахитов Р.Ш. Системы запуска авиационных газотурбинных двигателей : учебное пособие. – Уфа : Изд-во УАИ, 1977. – 120 с.
2. Габидуллина З.Г. Исследование разрядных процессов в емкостных системах зажигания : дис. ... канд. техн. наук / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2009. – 128 с.
3. Газизов Д.Р. Исследование влияния параметров разрядной цепи емкостной системы зажигания на ее воспламеняющую способность // Актуальные проблемы в науке и технике :

- сб. трудов 7-й Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых учёных, 14-16 февраля 2012. – Уфа : Технология, 2012. – Т. 2. - С. 19-21.
4. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : Изд-во УГАТУ, 2002. – 249 с.
5. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // Авиационная промышленность. – 2000. - № 1. – С. 56–60.
6. Гизатуллин Ф.А., Газизов Д.Р. К анализу воспламеняющей способности емкостных систем зажигания // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы : межвузовский сборник. – Уфа : Изд-во УГАТУ, 2009. – С. 22–26.
7. Гизатуллин Ф.А., Краснов А.В. Об одном подходе к оценке параметров проектируемых систем зажигания газотурбинных двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2000. – № 2. – С. 214.
8. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М. : Мир, 1986. – 566 с.
9. Талантов А.В. Горение в потоке. – М. : Машиностроение, 1978. - С. 37-53.

**Рецензенты:**

Хайруллин Ирек Ханифович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Рогинская Любовь Эммануиловна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.