

УДК 621.45.044

Ф. А. ГИЗАТУЛЛИН

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ ГТД С РАЗЛИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСИ

Анализируются подходы к определению параметров емкостных систем зажигания с полупроводниковыми свечами для основных типовых условий воспламенения топливовоздушных смесей в камерах сгорания и пусковых воспламенителях ГТД. Подходы основаны на использовании критерия электроискровой стабилизации пламени, критериев воспламеняющей способности систем зажигания применительно к различным механизмам воспламенения. Классифицированы методы совершенствования систем зажигания с учетом особенностей процессов стабилизации пламени в камерах сгорания и пусковых воспламенителях. *Емкостная система зажигания; критерий электроискровой стабилизации пламени; критерии воспламеняющей способности систем зажигания; воспламенение смеси; камера сгорания; пусковой воспламенитель; подходы к определению параметров систем зажигания; высотный запуск ГТД*

В камерах сгорания ГТД организация процессов устойчивого горения после выключения зажигания основана на едином аэродинамическом принципе: стабилизации пламени на поверхности нулевой скорости в зоне циркуляции за плохообтекаемым телом. Для стабилизации пламени необходим непрерывный подвод теплоты для поджигания образующейся в результате смешения горючего и окислителя свежей топливовоздушной смеси. В традиционных конструкциях непрерывный подвод теплоты осуществляется за счет создания за горелочным устройством вихревого рециркуляционного течения, направленного вдоль оси зоны горения [1]. Искрообразование в свечах системы зажигания необходимо только для первоначального инициирования процесса горения. Наиболее оптимальным местом расположения свечи является граница циркуляционной зоны, где скорость потока смеси практически равна нулю, а состав смеси является наиболее оптимальным.

Аналогичным образом организуется процесс горения в пусковых воспламенителях, которые устанавливаются в камерах сгорания вместо свечей зажигания при косвенном способе воспламенения топливовоздушной смеси. Однако в пусковых воспламенителях не всегда создается эффективная циркуляционная зона, что приводит к прекращению процесса горения после выключения зажигания. В этом случае стабилизация пламени в вос-

пламенителе происходит за счет непрерывного подвода энергии от свечи зажигания. Такой способ стабилизации пламени является электроискровым и осуществляется в большинстве типов пусковых воспламенителей. Как показано в работах [2, 3], методы повышения эффективности систем зажигания и систем воспламенения в целом существенным образом зависят от способа стабилизации пламени в устройствах горения, от условий запуска двигателей.

В статье анализируются возможные в практике применения газотурбинных двигателей типичные ситуации, связанные с особенностями воспламенения смеси и стабилизации пламени при запуске двигателей и определяющие различные подходы к расчету параметров систем зажигания.

Принципиальное различие условий воспламенения смеси при традиционной аэродинамической стабилизации пламени в камерах сгорания и электроискровой стабилизации в пусковых воспламенителях состоит в том, что в первом случае, когда рабочий торец свечи располагается на границе циркуляционной зоны, скорость потока смеси в зоне искрообразования практически равна нулю, т. е. воспламеняется неподвижная смесь; во втором случае воспламеняется движущаяся смесь.

Существенно, что рабочий торец свечи в камере сгорания располагается на границе нулевой скорости потока смеси только в услови-

ях наземного запуска ГТД. При высотном запуске двигателя условия в зоне расположения свечи меняются кардинально. При этом циркуляционная зона сужается и рабочий торец свечи оказывается в зоне высоких скоростей потока. Смещение границы циркуляционной зоны и соответствующее повышение скорости потока в зоне искрообразования значительно ухудшают условия воспламенения и являются одним из основных факторов, ограничивающих высотность запуска ГТД.

Таким образом, в течение цикла запуска двигателя возможны следующие условия воспламенения:

1. При непосредственном розжиге смеси в камере сгорания свечой скорость потока в зоне искрообразования близка к нулю, т.е. воспламеняется неподвижная смесь.

2. В условиях высотного запуска ГТД при непосредственном розжиге в камере сгорания воспламеняется движущаяся смесь.

3. При косвенном розжиге смеси с помощью пусковых воспламенителей смесь в зоне искрообразования в воспламенителе неподвижна, т.е. в воспламенителе существует эффективная циркуляционная зона и стабилизация пламени в самом воспламенителе является аэродинамической.

4. В условиях косвенного способа розжига смеси в воспламенителе отсутствует эффективная зона обратных потоков, воспламеняется движущаяся смесь и стабилизация пламени является электроискровой, возможной только при включенной системе зажигания.

Случаи 1 и 3, когда смесь в зоне искрообразования неподвижна, не имеют принципиальных отличий с точки зрения обеспечения требуемой воспламеняющей способности систем зажигания.

В работах [2–5] на основе исследования закономерностей искрового воспламенения горючих смесей предложены и реализованы новые подходы к проектированию и оценке эффективности систем зажигания ГТД. В основе новых подходов лежит разработанная обобщенная модель искрового воспламенения, позволившая примирить основные противоречия тепловых и нетепловых теорий воспламенения и установить критерии воспламеняющей способности систем зажигания для случаев электроискровой и аэродинамической стабилизации пламени и критерий электроискровой стабилизации пламени, соответствующий известному критерию Михельсона для стабилизации пламени плохобтекаемыми телами. Новые подходы ба-

зируются также на совместном рассмотрении электрических процессов в разрядных цепях систем зажигания и газодинамических процессов воспламенения смеси и стабилизации пламени в устройствах горения. Следует подчеркнуть, что критерий воспламеняющей способности систем зажигания при электроискровой стабилизации пламени принципиально отличается от критерия при аэродинамической стабилизации. Различия в критериях обусловлены преобладанием теплового или цепного механизмов воспламенения в зависимости от скорости потока смеси в зоне искровых разрядов в свечах зажигания [3]. Соответственно и методы повышения эффективности систем зажигания, вытекающие из критериев воспламеняющей способности, различаются существенно.

Подход к определению параметров емкостных систем зажигания применительно к приведенным выше типичным условиям воспламенения 1 и 3, когда воспламеняется, по существу, неподвижная смесь, основан на использовании соответствующего критерия воспламеняющей способности, полученного в работе [2] в виде

$$K = \frac{J_m t_{и}}{\sqrt[3]{f W_0 W_{св}}}, \quad (1)$$

где J_m — максимальное значение разрядного тока; $t_{и}$ — длительность искровой стадии разрядов в полупроводниковой свече; f — частота следования разрядов в свече; n — параметр, зависящий от аэродинамических свойств воспламенителя или камеры сгорания; $W_{св}$ — энергия разрядов в свече; $W_0 = \frac{C_H U_0^2}{2}$ — начальная энергия накопительного конденсатора; C_H — емкость конденсатора; U_0 — начальное напряжение на конденсаторе.

С учетом зависимостей величин $W_{св}$, J_m , $t_{и}$ от параметров элементов разрядной цепи системы зажигания выражение для критерия K принимает вид

$$K = \frac{4\sqrt{L}(U_0 - bt_{пс}) \left| \ln \frac{|U_{ост}|}{U_0 - bt_{пс}} \right|}{\sqrt[3]{f} \sqrt{C_H^3 R U_0^2 U_H (U_0 - bt_{пс} - |U_{ост}|)}} \times \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{C_H}{L}} R\right) \right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{C_H}{L}} R\right) \right)}, \quad (2)$$

где L — индуктивность разрядной цепи; R — активное сопротивление разрядной цепи; b —

коэффициент, зависящий от свойств полупроводниковой свечи; $t_{\text{пс}}$ — длительность подготовительной стадии разряда в свече; $U_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда; $U_{\text{н}}$ — максимальное значение падения напряжения в свече в течение искровой стадии разряда.

Выражение (2) является основой при расчете параметров емкостных систем зажигания для соответствующих условий воспламенения смеси. Анализ (2) показывает, что заданному значению критерия воспламеняющей способности K могут соответствовать различные сочетания параметров $C_{\text{н}}$ и L . В целях минимизации массы и габаритов проектируемой системы зажигания важно определить минимально допустимую величину $C_{\text{н}}$.

При фиксированной величине критерия K , который задается исходя из условий запуска ГТД по эмпирическим зависимостям критерия от давления и температуры среды, из уравнения (2) получается основное выражение для расчета минимально допустимой величины емкости накопительного конденсатора

$$C_{\text{нmin}} = \frac{\pi(U_0 - bt_{\text{пс}}) \left| \ln \frac{|U_{\text{ост}}|}{U_0 - bt_{\text{пс}}} \right|}{\sqrt{f} K U_0^2 U_{\text{н}} (U_0 - bt_{\text{пс}} - |U_{\text{ост}}|)}. \quad (3)$$

Дальнейшее развитие этого подхода к проектированию систем зажигания, описанное в [5], позволяет расчетным путем находить уточненное значение емкости конденсатора при заданной индуктивности разрядной цепи L .

Последующий расчет параметров систем зажигания после определения емкости конденсатора, включая расчет преобразователя для заряда емкостного накопителя, проводится по известной методике.

Методология определения параметров емкостных систем зажигания для типичного случая 4, т. е. при воспламенении смеси в пусковых воспламенителях в условиях расположения рабочего торца свечи в зоне высоких скоростей потока, основана на использовании критерия электроискровой стабилизации пламени, полученного в работе [3] в виде

$$V \sqrt{\frac{W_{\text{св}}}{f W_0 l J_m t_{\text{н}}}} = \text{const}, \quad (4)$$

где V — скорость потока смеси; l — путь, проходимый смесью в пределах воспламенителя.

Задачи определения параметров емкостных систем зажигания различных типов при электроискровой стабилизации пламени в воспламенителях решены в работах [2, 4, 6], получены выражения для расчета в первом приближении емкостей накопительных конденсаторов в функции параметров смеси, конструктивного параметра воспламенителя и известных параметров, характеризующих особенности разрядных процессов в полупроводниковых свечах.

Типичный случай 2 воспламенения смеси в камерах сгорания в условиях высотного запуска ГТД занимает особое место, стабилизация пламени во время действия источника зажигания не является в чистом виде ни аэродинамической, ни электроискровой. При высокой скорости потока смеси в зоне искровых разрядов распространение пламени на первичную зону камеры сгорания возможно только в случае, если ядро пламени, образованное искровым разрядом в свече вне циркуляционной зоны, войдет в контакт с границей этой зоны при движении в области прямых потоков. Модель искрового воспламенения смеси в условиях высотного запуска двигателей рассмотрена в [7], на основе результатов этой работы покажем общность приведенного выше критерия электроискровой стабилизации пламени, т. е. возможность применения этого критерия для анализа закономерностей искрового воспламенения смеси при смещении границы циркуляционной зоны с подъемом на высоту.

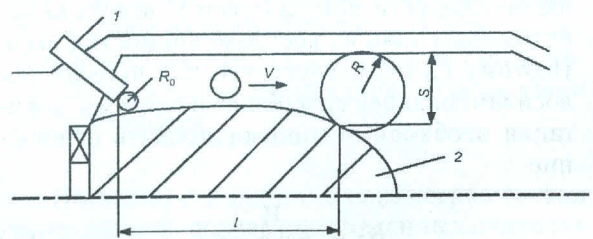


Схема движения ядра пламени в камере сгорания вне циркуляционной зоны

Схема движения ядра пламени в камере сгорания вне циркуляционной зоны показана на рисунке, где обозначено: 1 — свеча зажигания; 2 — циркуляционная зона; V — скорость потока смеси в пристеночной зоне камеры сгорания; R — радиус ядра пламени в зоне прямых потоков; R_0 — радиус начального ядра пламени, инициированного искровым разрядом в свече; S — характерный размер для зоны прямых потоков смеси в пределах длины циркуляционной зоны; l — расстояние

яние от свечи зажигания до точки на границе циркуляционной зоны, соответствующей характерному размеру S .

Условие распространения пламени на первичную зону камеры сгорания сформулируется так: ядро пламени, инициированное под воздействием разрядного импульса в свече, при движении вне циркуляционной зоны со скоростью потока смеси должно достичь размера, обеспечивающего касание ядра с границей зоны обратных потоков на расстоянии, меньшем длины циркуляционной зоны. Таким образом, условие распространения пламени запишется в виде

$$2R \geq S, \quad (5)$$

причем радиус ядра пламени R связан с параметрами потока смеси и расстоянием l в пределах длины циркуляционной зоны соотношением

$$\frac{l}{V} = \frac{R - R_0}{U}, \quad (6)$$

где U — турбулентная скорость распространения пламени.

Необходимо отметить, что характерный размер S зависит от высоты и скорости полета, изменяется по длине циркуляционной зоны и может быть определен по заданному положению границы циркуляционной зоны для конкретной камеры сгорания.

Для дальнейшего анализа обратимся к выражению (4) для критерия электроискровой стабилизации пламени. Известно, что повышение скорости потока смеси V всегда влияет отрицательно на воспламеняемость смеси. Поэтому из (4) следует, что для повышения воспламеняющей способности системы зажигания необходимо минимизировать отношение

$$K_1 = \frac{W_{св}}{fW_0J_m t_n}. \quad (7)$$

Параметр l , входящий в (4) как величина, пропорциональная длине циркуляционной зоны, определяется газодинамическими свойствами камеры сгорания и не зависит от эффективности системы зажигания. Как показано в [2, 3], параметры искровых разрядов в полупроводниковых свечах $W_{св}$, J_m , t_n , входящие в (4) и (7), взаимосвязаны, изменение одного из этих параметров вызывает изменение других параметров, поэтому анализировать влияние каждой из величин $W_{св}$, J_m , t_n на эффективность систем зажигания не

представляется возможным. Выражение (7), как показано в [3], является критерием воспламеняющей способности систем зажигания применительно к случаю воспламенения движущейся топливоздушной смеси. Эта величина однозначно определяет конечный результат воспламенения при прочих различных условиях.

На основании изложенного размер начального ядра пламени, инициированного искровым разрядом в свече, в первом приближении должен выражаться зависимостью

$$R_0 = C/K_1, \quad (8)$$

где C — постоянный коэффициент.

Из (6) и (8) с учетом (5) получим

$$K_1 \leq \frac{CV}{\frac{SV}{2} - Ul}. \quad (9)$$

Таким образом, выражение (9) позволяет определять требуемое для обеспечения высотного запуска двигателя значение критерия воспламеняющей способности системы зажигания в функции параметров смеси V , U , параметров S , l , определяемых конструктивными, газодинамическими характеристиками камеры сгорания.

Как показано в работе [3], критерий воспламеняющей способности систем зажигания, воспламеняющих движущуюся смесь, определяется параметрами разрядной цепи следующим образом:

$$K_1 = \frac{RU_H(U_0 - bt_{nc} - |U_{ост}|)}{f\sqrt{C_H}LU_0^2(U_0 - bt_{nc}) \left| \ln \frac{|U_{ост}|}{U_0 - bt_{nc}} \right|} \times \frac{1 + \exp\left(-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C_H}{L}}R\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C_H}{L}}R\right)}. \quad (10)$$

Система уравнений (9) и (10) является основой для расчета емкости накопительно-го конденсатора емкостных систем зажигания для двигателей с высотным запуском.

Решение этой задачи, выполненное в [7], приводит к следующему результату:

$$C_H = \left(\frac{B\pi R + \sqrt{B^2\pi^2 R^2 + 16B\pi RK_1\sqrt{L}}}{2\pi RK_1} \right)^2, \quad (11)$$

где

$$B = \frac{RU_H(U_0 - bt_{nc} - |U_{ост}|)}{f\sqrt{L}U_0^2(U_0 - bt_{nc}) \left| \ln \frac{|U_{ост}|}{U_0 - bt_{nc}} \right|}. \quad (12)$$

Из выражения (4) для критерия электроискровой стабилизации пламени следует, что для повышения воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, т.е. для увеличения скорости потока смеси, при которой возможно воспламенение, необходимо повышать выходную мощность системы зажигания, определяемую произведением fW_0 . При электроискровой стабилизации пламени в пусковых воспламенителях влияние частоты следования разрядов на устойчивость пламени является существенным [2]. Из описанного выше механизма распространения пламени на первичную зону камеры сгорания в условиях высотного запуска следует, что частота разрядных импульсов в свече не играет решающей роли, как в случае электроискровой стабилизации пламени, поэтому с целью минимизации отношения (7) при заданной мощности системы зажигания в случае высотного запуска ГТД необходимо уменьшать частоту разрядов при соответствующем увеличении накопленной энергии. Этот вывод согласуется с практикой разработки систем зажигания зарубежными фирмами. Известно, что в зарубежных ГТД параметры систем зажигания как элементов систем управления запуском могут меняться в зависимости от режима работы двигателей, в частности, после воспламенения смеси система зажигания переходит в режим сопровождения с пониженной частотой разрядов в свечах для получения возможности повторного запуска двигателей при срыве пламени в полете [8].

Проведенный анализ показывает общность установленного в [3] критерия электроискровой стабилизации пламени, возможность его применения для исследования закономерностей воспламенения смеси в условиях высотного запуска двигателей, когда взаимосвязанный механизм воспламенения и стабилизации пламени является промежуточным между основными типичными случаями электроискровой и аэродинамической стабилизации.

Таким образом, на основе анализа методологии определения параметров емкостных систем зажигания для различных возможных в практике применения ГТД типичных случаев воспламенения смеси можно сделать следующие общие практические рекомендации по повышению эффективности систем зажигания:

1. В условиях воспламенителей с электроискровой стабилизацией пламени методы повышения эффективности систем зажигания

основаны на минимизации соотношения (7) и могут быть реализованы различными способами, в частности:

- включением в разрядную цепь катушки индуктивности с высокой добротностью;
- снижением мощности разрядных импульсов при постоянстве энергии в свече;
- увеличением частоты следования разрядных импульсов.

2. Для воспламенителей с аэродинамической стабилизацией пламени и камер сгорания в условиях наземного запуска двигателей методы повышения эффективности основаны на минимизации соответствующего критерия воспламеняющей способности (1), но являются противоположными по отношению к случаю с электроискровой стабилизацией пламени. При этом основным методом является повышение мощности разрядов в условиях постоянства энергии накопительного конденсатора; включение индуктивности в разрядную цепь ухудшает воспламеняемость смеси.

3. Для ГТД с высотным запуском и непосредственным способом воспламенения смеси свечой в камере сгорания при заданной мощности системы зажигания необходимо уменьшать частоту следования разрядов с соответствующим увеличением накопленной энергии. Эффективность систем зажигания также повышается при всех мерах, направленных на снижение мощности разрядов в условиях постоянства энергии искровых разрядов. Одним из эффективных способов увеличения высотности воспламенения смеси является включение в разрядную цепь катушки индуктивности.

Погрешность расчетов параметров систем зажигания на основе предложенных подходов зависит от адекватности применяемых математических моделей разрядных процессов в системах зажигания и модели сложных тепловых и газодинамических явлений в камерах сгорания и пусковых воспламенителях ГТД.

На данном этапе математические модели разрядных процессов отработаны достаточно полно, существенные осложнения связаны с моделированием тепловых и газодинамических явлений в камерах сгорания и пусковых воспламенителях с учетом множества трудноучитываемых факторов, во взаимосвязанных процессах воспламенения смеси и стабилизации пламени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

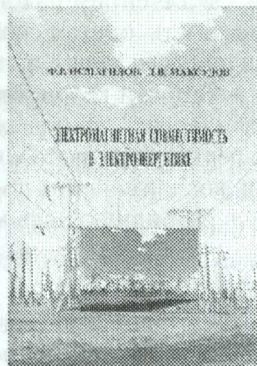
1. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
2. Гизатуллин Ф. А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
3. Гизатуллин Ф. А. К теории искрового воспламенения топливоздушных смесей в ГТД // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 56–60.
4. Гизатуллин Ф. А., Краснов А. В. Об одном подходе к оценке параметров проектируемых систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 2. С. 25–27.
5. Гизатуллин Ф. А., Байбури И. Х. Вопросы проектирования емкостных систем зажигания с учетом особенностей стабилизации пламени в камерах сгорания ГТД // Авиационная промышленность. 2000. № 2. С. 36–38.
6. Гизатуллин Ф. А., Байбури И. Х. Расчет параметров систем зажигания аperiodического разряда с учетом характеристик смеси в процессе искрового воспламенения и стабилизации пламени // Вестник УГАТУ. 2001. № 3. С. 195–197.
7. Гизатуллин Ф. А., Байбури И. Х. Особенности определения параметров емкостных систем зажигания для ГТД с высотным запуском // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 2. С. 44–46.
8. US Pat. 5 561 350. Ignition system for a turbine engine / J. R. Frus, F. B. Sontag. Oct. 1, 1996.

ОБ АВТОРЕ



Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, проф., зав. каф. электрооборуд. ЛА и наземн. транспорта. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА, эл-там и уст-вам выч. техники и систем упр-я (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. систем зажигания двигателей ЛА.

Сигнальная информация



Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов
**Электромагнитная совместимость
 в электроэнергетике
 в вопросах и ответах**

Научный редактор
 д-р техн. наук, проф. **И. Х. Хайруллин**

Уфа: УГАТУ, 2005

85 с. Табл. 16. Ил. 19. Библиогр.: 17 назв. ISBN 5-86911-517-5

В пособии освещены основные вопросы электромагнитной совместимости в электроэнергетике: происхождение кондуктивных и индуктивных помех, их воздействие на электроприемники и биологические объекты, способы борьбы с ними. Пособие является важным элементом при освоении студентами дисциплины «Контроль качества электроэнергии».

Рекомендовано Министерством образования Республики Башкортостан для студентов, обучающихся по специальности 140205 «Электроэнергетические системы и сети» по направлению 140200 «Электроэнергетика».