

Ф. А. Гизатуллин, Ф. Г. Бакиров, И. З. Полещук,
Р. М. Салихов, А. В. Лобанов, Р. А. Каримов, В. А. Чигвинцев

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ПО ИССЛЕДОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДУГООБРАЗОВАНИЯ В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЗАЖИГАНИЯ

Приводятся результаты разработки универсального экспериментального стенда, предназначенного для проверки работоспособности плазменных свечей зажигания, для исследования устойчивости электродуговых процессов в плазменных свечах в условиях, приближенных к реальным на различных режимах запуска современных и перспективных газотурбинных двигателей. *Плазменные системы зажигания; экспериментальный стенд; специальная камера; режимы запуска ГТД; плазменные свечи; устойчивость дугообразования; задачи исследований*

Эффективность плазменных систем зажигания определяется многими факторами, в том числе воспламеняющей способностью на различных режимах запуска двигателей, энергетическими характеристиками, массой и габаритами, ресурсом работы плазменных свечей и всей системы зажигания, термостойкостью, устойчивостью электродуговых процессов в свечах в широком диапазоне изменения скорости и расхода плазмообразующего воздуха, скорости потока в камере сгорания в зоне расположения свечи, температуры и давления в камере сгорания и другими факторами.

Воспламеняющая способность как основной показатель эффективности плазменных систем зажигания может оцениваться различным образом, например, по величине пусковой характеристики (диапазона воспламенения) камеры сгорания, по минимальному давлению среды, при котором возможно воспламенение, по максимальной скорости потока в зоне работы плазменной свечи, по времени задержки воспламенения смеси, по предельным значениям коэффициента избытка воздуха. Все названные возможности для определения воспламеняющей способности предполагают использование натуральных огневых стендов с воспроизведением реальных условий воспламенения в зависимости от режимов запуска двигателей и параметров среды [1, 2].

Создание и эксплуатация таких стендов сопряжены со значительными материальными затратами.

При использовании огневых стендов с реальными газотурбинными двигателями для контроля эффективности систем зажигания, когда воспламеняющая способность свечей оценивается по конечному результату, т. е. по созданию устойчивого фронта пламени во всем объеме камеры сгорания, возникают дополнительные осложнения, связанные с выявлением причин нерозжига смеси. Это связано с тем, что конечный результат воспламенения в камерах сгорания не определяется только эффективностью системы зажигания, а зависит также от организации рабочих процессов, определяющих особенности стабилизации пламени; возможна ситуация, когда система зажигания создает начальное ядро пламени в смеси, а воспламенения во всем объеме камеры сгорания не происходит в силу особенностей газодинамических характеристик, не связанных с эффективностью систем зажигания.

Применительно к плазменным системам зажигания, в которых, в отличие от емкостных систем зажигания с полупроводниковыми свечами, образование разряда критично к параметрам среды, дополнительно необходимо учитывать следующее обстоятельство.

Для надежного запуска двигателей в напряженных условиях, например, на больших высотах, при высоких скоростях полета, необходимо одновременное выполнение, как минимум, следующих условий:

- образование в плазменной свече устойчивого электродугового разряда;
- наличие определенного энергетического потенциала плазменной свечи для создания начального ядра пламени;

- развитие ядра пламени, созданного свечой, распространение пламени в камере сгорания на всю первичную зону, эффективная газодинамическая стабилизация пламени для обеспечения горения после выключения зажигания.

Первые два необходимые условия запуска двигателя определяются эффективностью системы зажигания, третье условие не зависит от системы зажигания, а лимитируется газодинамическими свойствами камеры сгорания.

Невыполнение любого из названных условий приводит к незапуску двигателя.

Таким образом, для выяснения причин возможных незапусков двигателей исследования эффективности плазменных систем зажигания должны проводиться в двух направлениях:

- исследование воспламеняющей способности плазменных свечей в зависимости от факторов (скорость потока, давление, температура среды), оказывающих определяющее влияние на процесс образования начального ядра пламени;
- исследование возможности и закономерностей образования электродугового разряда при воздействии параметров среды, определение предельных параметров среды, при которых еще возможно образование разрядов в плазменных свечах.

Реализация первого направления исследований, как отмечалось выше, требует наличия натурных огневых стендов с возможностью физического моделирования напряженных условий воспламенения; такими стендами обладают моторостроительные объединения и научные организации соответствующего профиля.

На основании изложенного, до оценки воспламеняющей способности целесообразным является проведение исследований закономерностей образования разрядов в плазменных свечах, устойчивости дугообразования в свечах в зависимости от многих факторов, в том числе от параметров элементов силовых и вспомогательных электрических цепей плазменных систем зажигания, от параметров плазмообразующего и сносящего потоков воздуха, давления среды и температуры.

В статье представлены результаты разработки универсального экспериментального стенда, предназначенного для проверки работоспособности плазменных свечей зажигания, для исследования устойчивости электродуговых процессов в плазменных свечах в условиях, приближенных к реальным на различных режимах запуска современных и перспективных газотурбинных двигателей.

Для указанных целей универсальный экспериментальный стенд разработан впервые; имеющиеся в настоящее время аналоги предназначены для решения частных задач, а именно, либо для определения пробивных напряжений плазменных свечей в условиях повышенного или пониженного давления, либо для проверки работоспособности свечей при изменении давления в статических режимах, т.е. без создания сносящего и плазмообразующего потоков воздуха.

Структурная схема разработанного и изготовленного стенда представлена на рис. 1, внешний вид стенда – на рис. 2.

Стенд с определенной степенью приближения имитирует условия работы плазменных свечей в специальной камере без подачи и воспламенения топлива при запуске ГТД в следующих режимах:

- наземный (стартовый) запуск;
- высотный запуск на режиме авторотации двигателя;
- высотный встречный запуск двигателя.

Специальная камера, в которой располагается плазменная свеча с запальным устройством, представляет собой прямой цилиндрический канал, через который проходит сносящий поток воздуха, со смотровыми окнами для визуального наблюдения и фоторегистрации плазменного выброса. Плазменная свеча с запальным устройством располагаются перпендикулярно оси камеры.

В стенде предусмотрено изменение в определенных пределах следующих параметров:

- скорости и расхода плазмообразующего воздуха через плазменную свечу;
- скорости и расхода сносящего потока воздуха в камере;
- перепада давления воздуха в плазменной свече;
- давления среды в камере в месте расположения свечи;
- температуры воздуха на входе в плазменную свечу;
- температуры сносящего потока;
- параметров элементов силовой части плазменных систем зажигания постоянного и переменного тока;
- энергии накопителя в составе осциллятора плазменной системы зажигания постоянного тока, предназначенного для пробоя плазменной свечи;

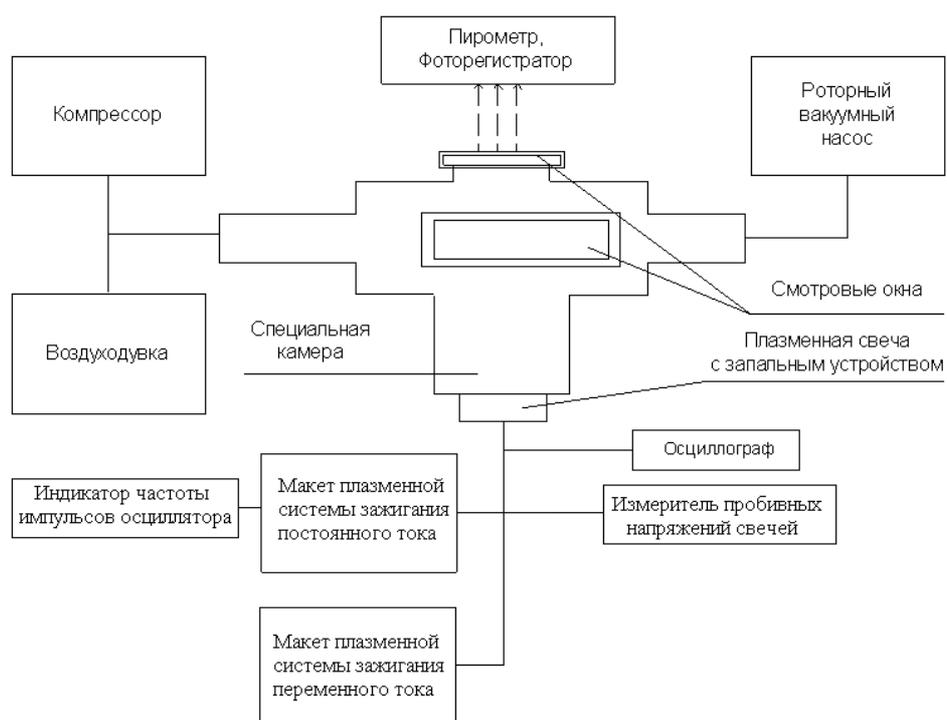


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

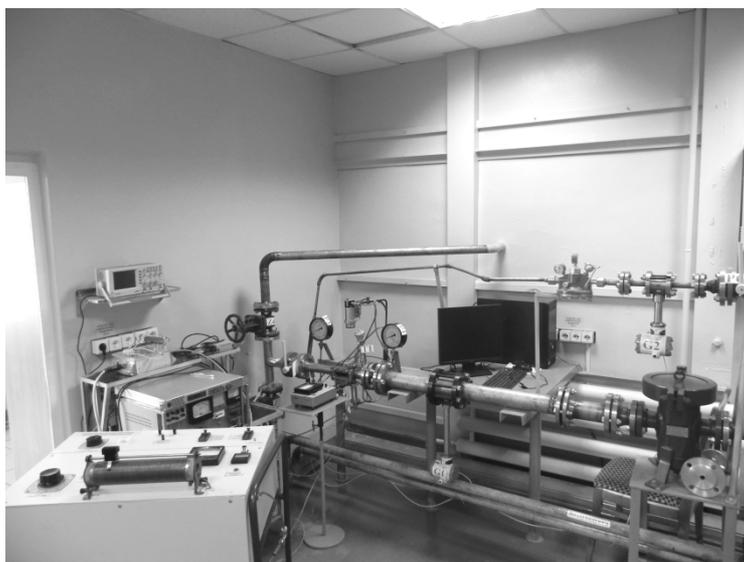


Рис. 2. Внешний вид стенда

- амплитуды тока осциллятора;
- длительности ионизирующего импульса осциллятора;
- частоты следования ионизирующих импульсов осциллятора;
- тока дугового разряда в плазменной свече;
- пробивного напряжения свечи.

Скорость плазмообразующего воздуха через плазменную свечу является независимой от скорости сносящего потока в камере.

В стенде предусмотрена регистрация и определение с приемлемой для инженерной практики точностью параметров, указанных выше, а также следующих данных:

- температуры плазменного выброса;

- электрических параметров, характеризующих плазменный выброс;
- осциллограмм тока и падения напряжения в ионизирующем разряде осциллятора;
- геометрических размеров плазменного выброса в плазменной свече.

Стенд укомплектован соответствующими датчиками и измерителями для регистрации параметров потока плазмообразующего воздуха, сносящего поток воздуха, электрических параметров электродугового разряда в плазменной свече и параметров ионизирующих разрядов осциллятора.

В газодинамической части стенда для имитации условий работы плазменных свечей в специальной камере предусмотрены три контура: высокого давления, низкого давления и контур, предназначенный для изучения влияния скоростей сносящего и плазмообразующего потоков воздуха на электродуговые процессы в плазменных свечах.

Контур высокого давления необходим для моделирования наземного и высотного встречного запуска двигателей. Имитация воздействия повышенного давления в специальной камере осуществляется в статическом режиме, то есть при скорости сносящего потока воздуха, равной нулю. При этом плазмообразующий воздух подается к свече через запальное устройство.

Контур низкого давления предназначен для моделирования высотного запуска в режиме авторотации. Имитация воздействия пониженного давления в специальной камере также осуществляется в статическом режиме при подаче плазмообразующего воздуха к свече через запальное устройство с помощью роторного вакуумного насоса.

Стенд укомплектован универсальными экспериментальными макетами плазменных систем зажигания постоянного и переменного тока с возможностью физического моделирования известных и перспективных вариантов исполнения разрядных цепей плазменных агрегатов зажигания, имеется также комбинированный измеритель динамических и статических пробивных напряжений свечей [4].

Осциллятор в составе экспериментального макета плазменной системы зажигания постоянного тока обеспечивает изменение в определенных пределах энергетических параметров ионизирующих разрядов (энергии, мощности, тока, падения напряжения, длительности, частоты следования разрядов).

Решаемые с использованием универсального стенда задачи можно объединить в рамках следующих направлений:

1. Оценка работоспособности плазменных систем зажигания в условиях, приближенных к реальным при запуске ГТД на различных режимах.

1.1. Определение предельно допустимых скоростей и расходов плазмообразующего и сносящего потоков воздуха, давления среды на различных режимах запуска, при которых в плазменной свече еще образуются электродуговые разряды.

1.2. Определение предельно допустимых скоростей и расходов плазмообразующего и сносящего потоков воздуха, давления среды на различных режимах запуска, при которых в плазменной свече образуются ионизирующие разряды осциллятора.

1.3. Исследование влияния конструктивных параметров плазменных свечей (междуэлектродного зазора, формы электродов, взаиморасположения плазменной свечи и запального устройства и др.) на предельные параметры среды (скорости потоков воздуха, давления среды) при образовании электродуговых разрядов.

2. Сравнительная оценка эффективности плазменных систем зажигания постоянного и переменного тока при фиксированных потребляемой мощности и частоты ионизирующих импульсов осцилляторов по предельно возможным параметрам воздушных потоков и давления среды, при которых плазменные свечи еще сохраняют работоспособность.

3. Исследование устойчивости дугообразования в плазменных свечах в зависимости от мощности источников питания, параметров силовых цепей плазменных систем зажигания при фиксированных и переменных параметрах воздушных потоков; исследование согласованности внешних характеристик источников питания и вольтамперных характеристик электрической дуги в плазменных свечах в условиях минимальных мощностей источников питания.

4. Исследование влияния частоты следования ионизирующих импульсов осциллятора на устойчивость электродуговых процессов в плазменных свечах при фиксированных и переменных параметрах воздушных потоков.

5. Оценка влияния параметров плазмообразующего и сносящего потоков воздуха, давления среды, параметров силовых цепей и осциллятора на геометрические размеры плазменного выброса в свечах.

6. Сравнительная оценка эффективности опытных и серийных плазменных систем зажигания по предельным параметрам (скорость и расход воздушных потоков, давление), при которых плазменные свечи еще сохраняют работоспособность.

7. Отработка конструктивных исполнений рабочих торцов плазменных свечей с целью обеспечения максимальной устойчивости электродуговых процессов и требуемых геометрических размеров плазменного выброса.

8. Исследование пробивных напряжений плазменных свечей при изменении рабочих зазоров и давления среды на различных режимах запуска двигателей.

Пробные экспериментальные исследования, проведенные на стенде, подтвердили требуемую точность регистрации всех основных параметров и возможности его применения для решения указанных выше задач, направленных на совершенствование плазменных систем зажигания газотурбинных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лефевр А.** Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. **Алабин М. А., Кац Б. М., Литвинов Ю. А.** Запуск авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1968. 228 с.
3. **Гизатуллин Ф. А.** Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
4. Измерение пробивных напряжений плазменных свечей зажигания газотурбинных двигателей / Ф. А. Гизатуллин [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 60–63.

ОБ АВТОРАХ

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, проф. каф. электромеханики. Дипл. инженер-электромеханик (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов, элементам и устройствам вычисл. техн. и систем управления (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. электрооборудования летательных аппаратов, систем зажигания ГТД.

Бакиров Федор Гайфуллович, проф., зав. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. теории авиационных и ракетных двигателей.

Полещук Игорь Захарович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1969). Канд. техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1982). Иссл. в обл. теории авиационных двигателей.

Салихов Ренат Мунирович, ст. преп. каф. электромеханики. Дипл. инженер (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по электротехническим комплексам и системам (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.

Лобанов Андрей Владимирович, доц. той же каф. Дипл. инженер (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по электротехн. комплексам и системам (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем зажигания ГТД.

Каримов Руслан Альтафович, ст. преп. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер-теплоэнергетик (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. теории авиационных двигателей.

Чигвинцев Вадим Алексеевич, техн. директор – первый заместитель генерального директора ОАО «УАПО».