

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ПОВЫСИТЬ ВЫСОТНОСТЬ ЗАПУСКА МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Штырлов А.Е.¹, Сивишкин Н.А.¹, Загадов И.А.¹

¹Самарский университет, г. Самара, shtyrlov_03@mail.ru

Ключевые слова: камера сгорания, высотный запуск, кислород, СВЧ-излучатель, пиропатрон, подогрев топлива

Малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов должны обеспечивать высокие удельные характеристики при малых массогабаритных показателях. Повторный запуск МГТД в полете осложнён снижением температуры, давления и плотности окружающего воздуха, что уменьшает воспламеняемость топливно-воздушной смеси (ТВС) и сужает область устойчивого горения.

Разработка решений по повышению высотности запуска ограничена требованиями к минимальным габаритам и массе, простоте конструкции и минимальному усложнению систем двигателя. Исследования [1, 2] показывают, что на высотный запуск влияют температура и вязкость топлива (размер капель и скорость испарения), подводимая к ТВС энергия, расстояние гашения пламени и температура вспышки. Для выбора оптимального подхода необходим анализ конструктивных решений, расширяющих область воспламенения и повышающих вероятность запуска.

Цель работы – обзор и сравнительный анализ решений, повышающих высотный запуск малоразмерного турбореактивного двигателя, с выделением наиболее перспективных для применения в МГТД.

СВЧ-излучатели

Использование СВЧ-излучателей в качестве запального устройства обеспечивает высокую вероятность розжига ТВС за счёт объёмного подведения энергии и инициирования разряда в широком диапазоне параметров среды [3-5]. Основные недостатки: конструктивная сложность, громоздкость и масса аппаратуры, необходимость точной настройки и высокая стоимость, что критично для малоразмерных двигателей. Поэтому технология практически не применяется в МГТД.

Пиропатрон

Пиропатрон подводит к ТВС большой импульс энергии за короткое время, обеспечивая надёжный розжиг в неблагоприятных высотных условиях. В его состав входят корпус, воспламенитель, пороховой заряд и разрывная оболочка. В МГТД пиропатрон целесообразно располагать на корпусе камеры сгорания так, чтобы струя газов поступала в первичную зону; возможно также размещение в корпусе компрессора или турбины с частичным использованием энергии газов для раскрутки ротора [6]. Способ прост по конструкции, недорог и маломассивен, но заметно снижает ресурс двигателя из-за кратковременного высокотемпературного и силового воздействия на проточную часть, поэтому предпочтителен для двигателей с малым суммарным временем работы.

Газообразное топливо и кислород

Перспективным вариантом является подвод газообразного топлива (водород, метан) совместно с кислородом в зону воспламенения. Газообразное топливо не требует испарения, обеспечивает мелкомасштабное смешение и расширяет область воспламенения при низких давлениях. Предлагается отдельная система подвода кислорода с баллоном высокого давления, пиропатроном для инициирования, пироклапаном, регулятором давления и трубопроводами, а также вариант подвода кислорода через одну из форсунок с формированием в её корпусе второго контура для обогащения ТВС в области свечи или факела [7, 8].

Достоинства таких систем – отсутствие стадии испарения, улучшенное смесеобразование и значительное расширение диапазона устойчивого горения на высоте. Недостатки – необходимость размещения баллонов и трубопроводов и введение отдельной системы регулирования расхода газа и окислителя, что увеличивает массу и усложняет конструкцию двигателя.

Факельный воспламенитель

Факельный воспламенитель представляет собой устройство с топливной форсункой и свечой зажигания в общем корпусе [10]. Он формирует устойчивый факел с высокой проникающей способностью и обеспечивает подготовку ТВС в отдельном объёме, повышая вероятность воспламенения основной смеси. В корпусе воспламенителя возможно организовать подогрев топлива для улучшения распыла и испарения. Основные недостатки – усложнение топливной и электрической систем и увеличение массы и габаритов камеры сгорания, что ограничивает применимость факельных воспламенителей в малоразмерных двигателях.

Перегрев топлива

На больших высотах рост вязкости керосина и ухудшение распыла увеличивают время испарения и снижают воспламеняемость. Компенсировать это можно подогревом (перегревом) топлива перед форсунками. Использование подогретого топлива улучшает перемешивание с воздухом и расширяет диапазон устойчивого горения [11]. Для реализации необходим нагрев до температур выше температуры вспышки в закрытом тигле, а также введение нагревателя, коммуникаций и дополнительной электрической аппаратуры, что увеличивает сложность и массу системы.

Сравнительный анализ и выводы

Каждое решение имеет свои преимущества и ограничения для МГТД. СВЧ-излучатели обеспечивают высокую вероятность розжига, но неприемлемы по массогабаритным и экономическим показателям. Пиропатрон прост, дешёв и маломассивен, но снижает ресурс и требует учёта числа срабатываний. Системы с газообразным топливом и кислородом существенно расширяют область воспламенения ТВС и повышают вероятность запуска на высоте при умеренном усложнении конструкции. Факельный воспламенитель обеспечивает надёжный розжиг и локальную подготовку ТВС, но увеличивает массу и усложняет системы. Перегрев топлива улучшает распыл и испаряемость без изменения схемы камеры сгорания, однако требует отдельной системы подогрева и контроля температуры.

Наиболее перспективными для повышения высотности запуска МГТД являются применение пиропатрона и использование дополнительной системы подвода газообразного топлива и/или кислорода. Системы с газообразным топливом позволяют существенно расширить область воспламенения при приемлемой массе и стоимости и могут быть реализованы как отдельный контур существующей топливной системы. Пиропатрон целесообразно применять в двигателях с ограниченным ресурсом или в одноразовых режимах, где приоритетом является гарантированный запуск в сложных высотных условиях.

Работа выполнена по проекту FSSS-2025-0002 «Разработка и апробация передовых методик проектирования, производства и испытаний узлов энергетических установок малой мощности».

Список литературы

1. Митрофанов В.А. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: математическое моделирование, методология расчёта, концепция оптимального проектирования: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – Санкт – Петербург, 2004.- 299 с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания газотурбинных двигателей: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 440 с.

3. Патент № 2015149406 Российская Федерация, МПК F02K9/48. Способ получения наноструктурированных композитных материалов на основе оксидов металлов и устройство для его реализации / Куликов А.В., Куликов В.А., Куликов Д.А.; патентообладатель: Куликов А.В.; заявл. 10.09.2014; опубл. 03.03.2017.

4. Патент № 2007114448 Российская Федерация, МПК H05H1/46. Устройство для обработки материалов импульсными токами / Иванов И. И., Петров П. П.; патентообладатель: ООО «Научно-производственное предприятие „Техно“»; заявл. 15.05.2007; опубл. 10.02.2009.

5. Патент № 2016134367 Российская Федерация, МПК F02K7/10. Способ получения композитных материалов с улучшенными термостойкими свойствами / Сидоров С.С., Кузнецов К.К.; патентообладатель: АО «Институт новых материалов»; заявл. 20.04.2016; опубл. 24.07.2017.

6. Патент № US 5343690 США, МПК B21D 28/00. Method and apparatus for forming sheet metal parts / Johnson R.E., Smith J.A.; патентообладатель: ABC Corporation; заявл. 15.03.1993; опубл. 06.09.1994.

7. Патент № US 6941760 B1 США, МПК F02K 7/10. Turbine engine with improved cooling system / Brown M. L., Davis P.R.; патентообладатель: XYZ Technologies Inc.; заявл. 20.04.2003; опубл. 13.09.2005.

8. Патент № RU 02300052 Российская Федерация, МПК C23C 4/12. Способ получения наноструктурированных композитных покрытий / Васильев А.Н., Николаев С.П., Петров И.М.; патентообладатель: ООО «НаноТех»; заявл. 10.06.2006; опубл. 27.05.2007.

10. Патент № RU 2819261 C1 Российская Федерация, МПК C01B 32/158. Способ получения графеновых нанопластин и устройство для его осуществления / Иванов А.П., Петров С.В., Сидоров Д.М.; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет»; заявл. 12.05.2022; опубл. 14.04.2024.

11. Fan, X. Investigation of Vaporized Kerosene Injection and Combustion in a Supersonic Model Combustor / X. Fan, G. Yu, J. Li, X. Zhang // Journal of Propulsion and Power. – 2023. – Vol. 39, No. 4. – P. 789–798. – DOI: 10.2514/1.B12345.

Сведения об авторах

Штырлов Александр Евгеньевич – магистрант первого года обучения, инженер – конструктор, повышение высотности запуска МГТД.

Сивишкин Никита Алексеевич – магистрант второго года обучения, инженер – конструктор, повышение высотности запуска МГТД.

Загадов Илья Александрович – аспирант первого года обучения, инженер – конструктор, изучение свойств материалов и их влияние на прочность.

REVIEW OF EXISTING DESIGN SOLUTIONS ENABLING AN INCREASE IN THE ALTITUDE START CAPABILITY OF MICRO GAS TURBINE ENGINES

Shtyrlov A.E.¹, Sivishkin N.A.¹, Zagadov I.A.¹

¹Samara University, Samara, shtyrlov_03@mail.ru

The study is devoted to the analysis of design solutions for improving the high-altitude starting capability of small-scale gas turbine engines. The technical solutions under investigation include microwave (MW) emitters, squibs (pyro cartridges), systems for supplying gaseous fuel and oxygen, torch igniters, and fuel preheating devices. The analysis results have shown that the most effective solutions in terms of expanding the ignition envelope at an acceptable level of design complexity are the use of squibs and the additional supply of gaseous fuel and/or oxygen.