

УДК 621.452.3.034

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ПРИМЕНительно К МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ГТД

©2011 А. Ю. Васильев, О. Г. Челебян, В. И. Ягодкин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

Создан новый форсуночный модуль, удовлетворяющий всем предъявленным требованиям. Предложенный модуль позволяет улучшать структуру поля течения топливоздушной смеси и обеспечивать высокое качество распыливания топлива, что, в свою очередь, позволит получить широкий диапазон запуска и устойчивую работу камеры сгорания в земных и высотных условиях. Повышена степень гомогенизации смеси, и, как следствие, можно ожидать снижения эмиссии вредных примесей на выходе из газотурбинного двигателя.

Пневматическая форсунка, топливоздушная смесь, распыливание топлива, факел распыла, распределение топлива, диаметр капель, зона обратных токов.

Ухудшение экологического состояния окружающей среды и ужесточение норм на вредные выбросы требуют разработки экологически «чистых» камер сгорания ГТД. Основное внимание здесь уделяется снижению в продуктах сгорания оксидов азота (NO_x), монооксида углерода (CO), несгоревших углеводородов (UHC) и дымления. Уровень выброса вредных веществ зависит от качества подготовки смеси во фронтном устройстве. Одним из признанных в мировой практике методов снижения выбросов вредных веществ является применение устройств с пневматическим распыливанием топлива. Недостатком таких устройств является затруднённый запуск камеры сгорания, особенно в высотных условиях.

В связи с вышеизложенным задача данного исследования сформулирована следующим образом: обеспечение высокого качества распыливания топлива, расширение диапазона запуска камеры сгорания в земных и высотных условиях (за счёт организации на оси устройства зоны обратных токов (ЗОТ)), повышение степени гомогенизации смеси (уменьшение окружной и радиальной неравномерностей распределения капель топлива) и, как следствие, снижение

уровня эмиссии вредных примесей на выходе из газотурбинных двигателей.

В результате проведённых предварительных работ был выпущен комплект чертежей, необходимых для изготовления сдвоенных форсунок новой схемы применительно к испытаниям полноразмерной КС. Форсунку, помимо прочих достоинств, отличает простота конструкции. Сама распыливающая головка без подводящих трубопроводов состоит всего из двух деталей: втулки и корпуса (рис.1).



Рис. 1. Фотография изготовленных деталей новой форсунки

В комплект для сборки сдвоенной форсунки входит ещё всего 3 детали: крепёжный фланец и 2 топливных трубопровода. Модель такой сдвоенной форсунки показана на рис. 2.

Форсунка имеет тангенциальный завихритель в центральном воздушном канале, позволивший увеличить степень закрутки воздушного потока, т.е.

расширить ЗОТ на оси устройства. Увеличение объёма ЗОТ влечёт за собой улучшение стабилизации пламени и пусковых характеристик устройства.

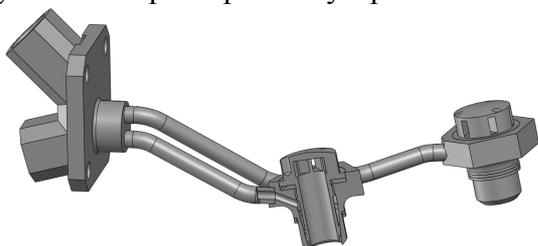


Рис. 2. Объёмная модель разработанного двойного форсуночного модуля

Увеличение степени закрутки воздушного потока также позволяет интенсифицировать процесс распыливания и перемешивания капель топлива с воздухом. За форсункой генерируется интенсивное турбулентное течение с уровнем пульсаций скорости, сопоставимым со значением средней вращательной компоненты скорости. Это позволяет сформировать мелкодисперсионную, хорошо перемешанную топливовоздушную смесь. Применение в газотурбинном двигателе форсунок пневматической схемы позволяет, как указано в работе А. Лефевра [1], значительно снизить дымление на выходе из двигателя. Повышение степени гомогенизации смеси, достигаемое с помощью предлагаемой пневматической форсунки, обеспечивает рост полноты сгорания. Мелкость капель распыленного топлива, обеспечиваемая данным устройством, достигает 20-40 мкм уже на режиме малого газа. Это по данным ряда работ, в частности Кутыша Д. И. [2], позволяет достичь минимальных значений выбросов вредных веществ.

Суммарная площадь тангенциальных каналов и воздушного сопла выбрана по результатам расчётов таким образом, чтобы максимально увеличить расход воздуха через центральный канал и сократить до минимума потери окружной составляющей скорости потока. Перечисленное положительно скажется на

пусковых характеристиках (земных и высотных) и пределах устойчивого горения.

Таким образом, конструкция форсунки позволяет повышать мелкость дробления капель, улучшать перемешивание жидкой и газообразной фаз (повышать степень гомогенизации смеси) и получать за устройством факел заданной геометрии и наполненности, что снижает уровень выброса вредных веществ CO , CH , NO_x и дымление.

Конструктивная схема предлагаемой форсунки с указанием основных элементов показана на рис.3. Сама форсунка состоит из втулки 1 и корпуса 2. На втулке 1 расположены шнековые каналы 3 конического топливного завихрителя 4, тангенциальные каналы 5 центрального воздушного завихрителя 6, воздушный канал 7, прижимная резьба 8, кромка 9 воздушного сопла 10. Корпус 2 включает в себя: кромку 11 топливного сопла 12, подводной топливный канал 13, кольцевую полость 14 и конический участок 15.

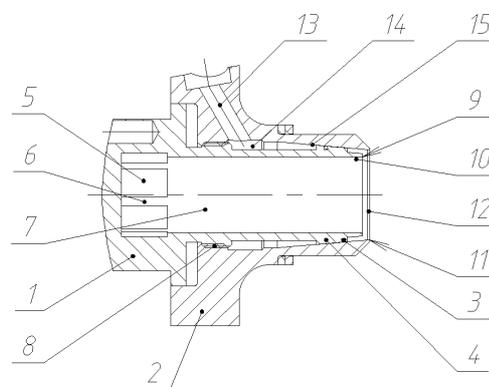


Рис. 3. Конструктивная схема предлагаемой форсунки

Принцип работы устройства: топливо, подающееся в форсунку через подводной топливный канал 13, равномерно распределяется по окружности в кольцевой полости 14, закручивается (спирально) в шнековых каналах 3 конического топливного завихрителя 4, сливается в равномерную топливную пленку на коническом участке 15 и попадает в топливное сопло 12. Воздух от набегающего потока вводится в

тангенциальные каналы 5 центрального воздушного завихрителя 6, проходя через воздушный канал 7, расположенный по оси втулки 1, срывается с кромки 9 воздушного сопла 10 и прижимает поток топлива к кромке 11 топливного сопла 12, обеспечивая тем самым наилучший распыл топлива. Прижимная резьба 8 обеспечивает плотное прилегание (без подтекания) конического топливного завихрителя 4 к ответному коническому участку 15 корпуса 2.

На данную конструкцию форсуночного модуля подана заявка на изобретение. Ниже перечислены основные отличительные технические решения устройства и дано обоснование их полезности.

1. В центральном воздушном канале по оси установлен завихритель с тангенциальными прорезями. Завихритель расположен на входе в осевой канал втулки (на удалении от места подачи топлива), это позволяет избежать затягивания (попадания) в него топлива и исключить стабилизацию пламени в следах за лопатками, приводящую к образованию локальных прогаров и нарушению работы устройства. Конструкция тангенциального завихрителя позволяет получать при одинаковом посадочном диаметре форсунок больший расход воздуха. Лопатки воздушного завихрителя не загромождают воздушный канал в его узком сечении, т.е. степень заполнения воздушного канала может быть больше. Большой расход воздуха по центральному каналу позволяет улучшать перемешивание топлива с воздухом (повышать степень гомогенизации смеси), к тому же больше энергии воздушного потока может быть затрачено на дробление потока жидкости, т.е. возможно получение более мелкодисперсного распыла топлива. Направленные под углом 90° к оси устройства прорези тангенциального завихрителя обеспечивают большую степень закрутки воздушного потока.

Большая степень закрутки позволяет улучшать «прижатие» топлива к потоку из внешнего воздушного завихрителя, качественно дробить жидкость между двух потоков воздуха и исключать отражение частиц топлива от внешнего воздушного потока обратно на ось факела. Это же позволяет расширять ЗОТ на оси устройства, что приведёт к улучшению стабилизации пламени, т.е. к расширению диапазона устойчивой работы камеры сгорания и увеличению области уверенного запуска газотурбинного двигателя.

2. В форсунке конусный шнековый завихритель закручивает топливо с тем же направлением, что и воздушный поток. Это позволяет при увеличении относительного импульса впрыска топлива оттянуть распад топливной плёнки дальше от сопла, туда, где её толщина, следовательно и получаемые капли, становятся минимальными. Завихритель выполнен коническим для уменьшения подтекания топлива по посадочному зазору между деталями, угол конуса должен быть минимальным – с целью исключения отрывов потока от поверхности. Такой топливный завихритель позволяет получать на выходе из него топливную пелену с заданными характеристиками.

3. Заглубление кромки воздушного сопла относительно кромки топливного сопла в прямоугольной системе координат на плоскости определяются уравнением: $X=Y \cdot ctg\varphi$, где X – выступ выходной кромки воздушного сопла относительно выходной кромки топливного сопла по оси абсцисс; Y – расстояние между выходной кромкой воздушного сопла и выходной кромкой топливного сопла по оси ординат; φ – расчётный угол раскрытия топливной пелены.

Это обеспечивает раскрытие топливной пелены без касания выходных кромок воздушных каналов и создает условия распыла топлива с наименьшим размером капель и образованием гомогенной ТВС на выходе из устройства.

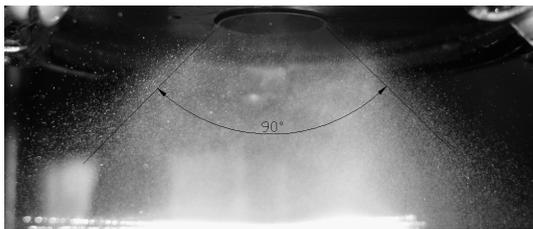


Рис. 4. Фотография факела распыла

Теперь рассмотрим результаты экспериментальных исследований. На рис. 4 приведена фотография факела распыла при измерении характеристик аэрозоля лазерным лучом по методу фазодоплеровской анемометрии. Угол указан с учётом того, что съёмка производилась под углом 25° снизу.

Видно, что граница факела достаточно четко очерчена. Угол факела достигает 90°. Факел имеет мелкодисперсную структуру, а следовательно, меньше и количество топлива, выбрасываемого на периферию за границу факела.

На рис.5 приведены расходные характеристики разработанного устройства по топливу и совместно с внешним завихрителем по воздуху. Полученный коэффициент расхода (FN) по топливу приблизительно равен 0,49. Коэффициент расхода воздуха составляет 10, с учётом проницаемости центрального канала форсунки.

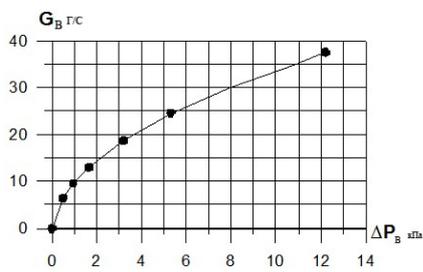
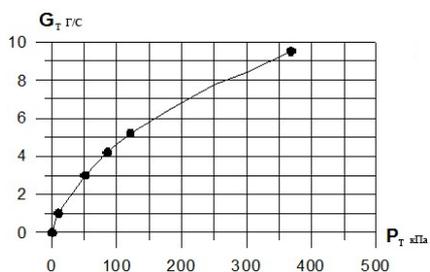


Рис. 5. Расходные характеристики разработанного устройства по топливу и воздуху

На рис.6–8 приведены кривые распределения характеристик по диаметру факела форсуночного модуля, полученные методом фазодоплеровской анемометрии. Режимные параметры для всех экспериментальных точек: $Y=30$ мм, $DP_k=3,3$ кПа, $G_0=18$ г/с, $G_m=2,3$ г/с. Распределение объёмной концентрации топлива (C_v) в газе (рис.6) имеет симметричный и достаточно равномерный вид. Это свидетельствует о достигнутой хорошей окружной равномерности распределения топлива без образования переобогащённых зон.

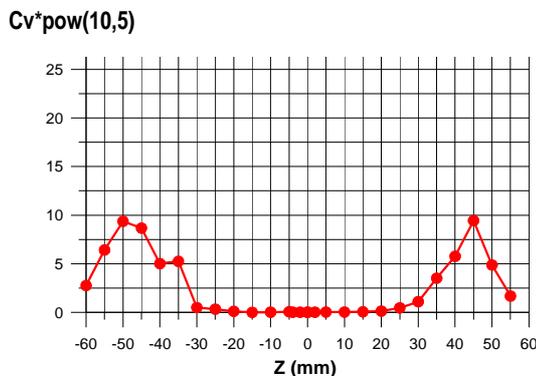


Рис. 6. Распределение концентрации капель топлива по диаметру факела

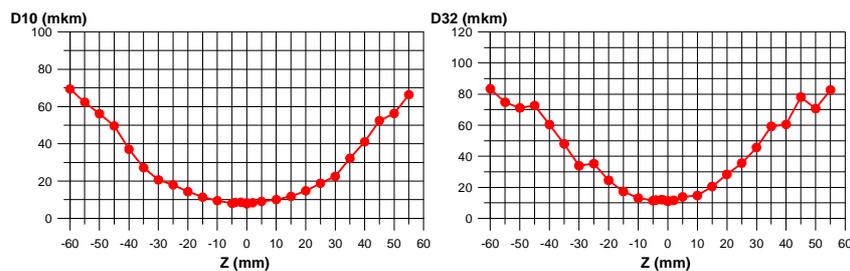


Рис. 7. Распределение среднего (D_{10}) и среднезаулеровского (D_{32}) диаметра капель топлива

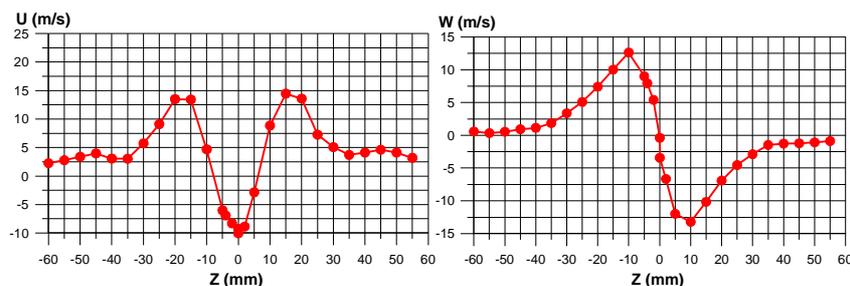


Рис. 8. Распределение осевой (U) и окружной (W) составляющих скорости капель топлива

Показанное на рис.7 распределение средних диаметров капель топлива также является симметричным и плавно изменяющимся (без резких скачков и провалов). Значения величин D_{10} и D_{32} близки для каждой отдельно взятой точки, это указывает на то, что разброс пролетающих через измерительный объём капель достаточно мал. Другими словами, пролетающие капли имеют одну и ту же размерность, испаряться и сгорать они будут одновременно в ровном фронте пламени. Распределение осевой и окружной составляющих скорости капель топлива представлено на рис.8. Заметна достаточно ярко выраженная зона обратных токов, её интенсивность на оси достигает 10 м/с (2/3 от полной скорости), и явный рост окружной составляющей скорости, которая теперь равна значению осевой. Это позволяет затягивать в зону достаточное количество мелких капель топлива для стабилизации в ней пламени и добиваться лучшей устойчивости топливовоздушного факела.

Итак, распределение объёмной концентрации топлива имеет симметричный и достаточно равномерный вид. Это свидетельствует о достигнутой хорошей окружной равномерности

распределения топлива без образования переобогащённых зон. В то же время капли в каждой отдельной области имеют одну и ту же размерность. Перечисленные свойства являются признаками хорошо перемешанной смеси с высокой степенью гомогенизации. Совокупность этих признаков позволит равномерно испарить капли, и сгорать они будут почти одновременно, в ровном фронте пламени. Хорошая мелкость капель и наличие развитой зоны обратных токов должны позволить улучшить запуск КС и пределы устойчивого горения. А высокая степень гомогенизации смеси должна позволить уменьшить эмиссию вредных веществ.

На рис.9 представлены фотографии факелов (сверху вниз) разработанного форсуночного модуля и факел распыливания для устройства прототипа при 3 кПа перепада давления воздуха. Легко заметить значительное улучшение качества распыливания при использовании нового форсуночного модуля. При этом уменьшился выброс крупных капель топлива за границу факела. Качество работы пневматического форсуночного модуля при перепаде 1 кПа стало сравнимо с работой исходного устройства при 3 кПа.

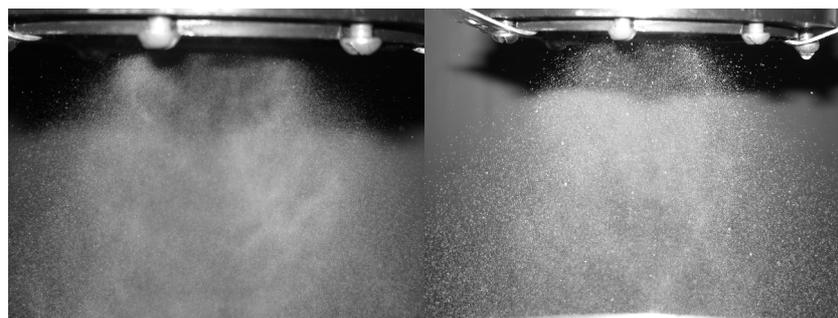


Рис. 9. Фотографии факелов (слева направо) нового форсуночного модуля и факела распыливания для исходного устройства при 3 кПа перепада давления воздуха

Заключение

Разработан и испытан новый пневматический форсуночный модуль применительно к малоэмиссионной камере сгорания перспективного двигателя. Экспериментально подтверждено, что предложенный модуль позволяет улучшать структуру поля течения топливоздушнoй смеси и обеспечивает высокое качество распыливания топлива, что, в свою очередь, позволит получить широкий диапазон запуска и устойчивую работу камеры сгорания в земных и высотных условиях. Получена высокая степень гомогенизации смеси, и, как следствие, можно ожидать снижения уровня эмиссии на выходе из газотурбинного двигателя.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект №08-08-00428.

Библиографический список

1. Лефевр, А.Н. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А.Н. Лефевр. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. Кутыш, Д. И. Оптимизация геометрических и газодинамических параметров устройства двухступенчатого смешения топлива и воздуха малоэмиссионной камеры сгорания конвертированного авиационного двигателя [Текст]: автореферат дис. ... кан. тех. наук: 05.07.05 / Д.И. Кутыш. - М. - 2004. – 215 с.

DESIGN AND INVESTIGATION OF A PNEUMATIC ATOMIZER AS APPLIED TO A LOW EMISSION COMBUSTION CHAMBER OF A PROMISING GAS-TURBINE ENGINE

©2011 A. Yu. Vasilev, O. G. Chelebyan, V. I. Jagodkin

Central Institute of Aviation motors named after P. I. Baranov (CIAM), Moscow

A new injector module has been developed that meets all the requirements made. The module proposed makes it possible to improve the structure of the field of flow of fuel-air mixture and to ensure high quality of fuel atomization, which, in turn, will make it possible to obtain a wide range of starting and steady operation of the combustion chamber under the terrestrial and high – altitude conditions. The degree of homogenization of the mixture is increased, and, as a consequence, we can expect lower emission of harmful impurities at the output of the gas turbine engine.

Pneumatic atomizer, fuel-air mixture, fuel atomization, spray cone, fuel distribution, droplet diameter, reverse current zone.

Информация об авторах

Челебян Оганес Грачьевич, аспирант, инженер по КИПиА, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. E-mail: oganeschelebyan@mail.ru. Область научных интересов: распыливание топлива, пневматические форсунки.

Васильев Александр Юрьевич, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. E-mail: vasiliev@ciam.ru. Область научных интересов: комбинированные форсуночные модули, пневматические форсунки, визуализация потоков.

Ягодкин Виктор Иванович, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. E-mail: yagodkin@ciam.ru. Область научных интересов: распыливание топлива, оптические методы исследования, камеры сгорания.

Chelebyan Oganés Grachyaevich, post-graduate student, Instrumentation engineer, CIAM. E-mail: oganeschelebyan@mail.ru. Area of research: fuel atomization, pneumatic atomizer.

Vasiliev Aleksandr Yurievich, cand. tech. sci, head of the CIAM sector. E-mail: vasiliev@ciam.ru. Area of research: combined sprayer modules, pneumatic sprayers, flow visualization.

Yagodkin Viktor Ivanovich, cand. tech. sci, head of the CIAM sector. E-mail: yagodkin@ciam.ru. Area of research: fuel atomization, optical stress analysis, combustion chamber.