

УДК 621.452.3.034

РАЗРАБОТКА ПУСКОВЫХ ФОРСУНОК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ПОЛНОРАЗМЕРНОЙ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2013 А. Ю. Васильев, П. И. Блюмкин, О. Г. Челебян

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

Для обеспечения устойчивой работы и уверенного розжига основной камеры сгорания (КС) газотурбинного двигателя в высотных условиях полёта разработана новая схема пусковых форсунок пневматического типа. Проведённые огневые испытания в полноразмерной малоэмиссионной КС (ПМКС) показали их принципиальную работоспособность. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования двух вариантов пусковых форсунок с целью определения сравнительных пусковых и срывных характеристик на различных высотах.

Камера сгорания, малоэмиссионная камера, пусковая форсунка, воздушный завихритель, топливо-воздушная смесь, граница воспламенения, срыв пламени, эмиссия вредных выбросов.

Основной задачей пусковых форсунок является уверенный розжиг камеры сгорания как в земных условиях ($H=0$ км), так и на высоте ($H=7$ км). Трудность заключается в организации широкой и стабильной зоны воспламенения, подготовке и подаче мелкодисперсной равномерно перемешанной топливоздушной смеси в зону устойчивого горения. В процессе исследований первого варианта разработанной малоэмиссионной камеры сгорания (МКС) (двигателя ПС-12) среди прочих проблем была выявлена проблема отсутствия уверенного розжига камеры сгорания в высотных условиях и очень узкая область устойчивого запуска.

В работе [1] в 2010 году была проведена расчётно-экспериментальная дора-

ботка пусковых форсунок МКС и начат этап их экспериментальных исследований. В процессе доработки была выявлена необходимость разработки полностью новой схемы форсунки, такие устройства были спроектированы в ЦИАМ и изготовлены, в 2010 году были проведены «холодные» исследования устройств, показавшие их принципиальную работоспособность и позволившие сделать заключение о возможных улучшениях основных характеристик камеры сгорания при применении изготовленных устройств. В 2011 году на форсуночный модуль камеры сгорания получен патент РФ на изобретение № 2439430. Фотографии сдвоенного форсуночного модуля, её основных деталей и факел распыла представлены на рис. 1.

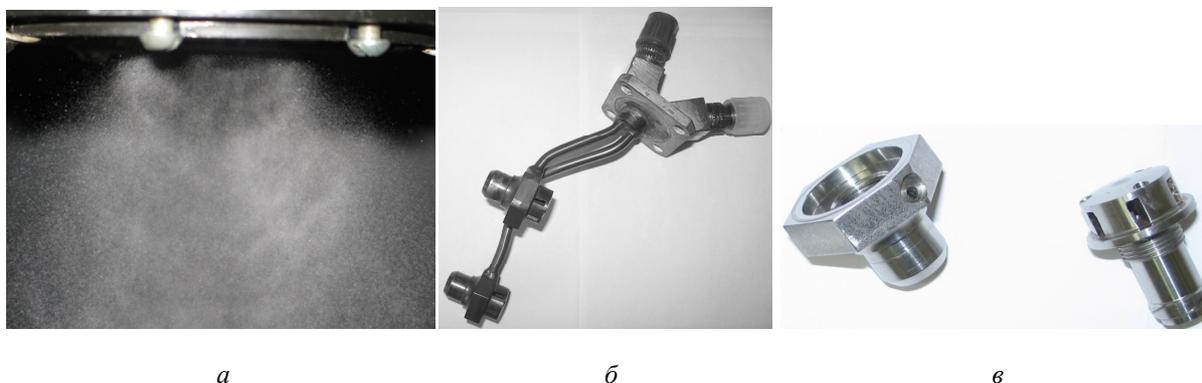
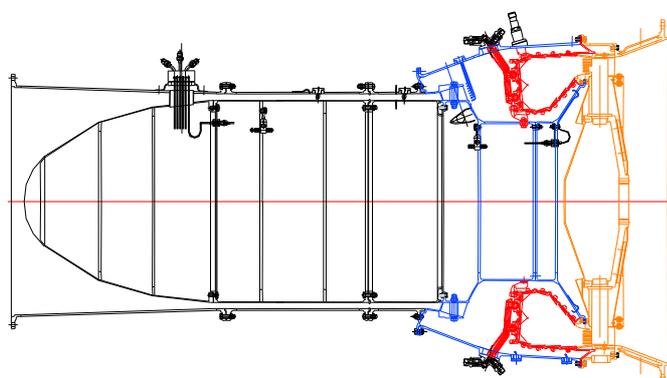


Рис. 1. Фотографии форсуночного модуля камеры сгорания:
а – сдвоенная форсунка ЦИАМ; б – факел распыла; в – корпус и втулка головки форсунки

Для уверенной стабилизации пламени разработанной форсуночный модуль имеет 2 типа воздушных завихрителей с однонаправленной закруткой воздушного потока, обеспечивая заданные требования по распределению и дроблению топлива, а также создание достаточно интенсивной и протяжённой зоны обратных токов. Завихритель с тангенциальными прорезями изготовлен заодно с центральной втулкой форсунки, а отдельный внешний осевой завихритель – с углом установки лопаток 55° . Закрученные по спирали струи топ-

лива, взаимодействуя между двумя закрученными потоками воздуха, позволяют получить на выходе хорошо перемешанную однородную структуру топливовоздушной смеси. Это позволит, в свою очередь, получать широкий диапазон запуска и устойчивую работу камеры сгорания в земных и высотных условиях полёта. Фотография камеры сгорания в собранном виде с подключёнными коллекторами и схема установки её на стенде представлены на рис.2.



а б
Рис.2. Фотография ПКС и схема установки на стенде ЦИАМ

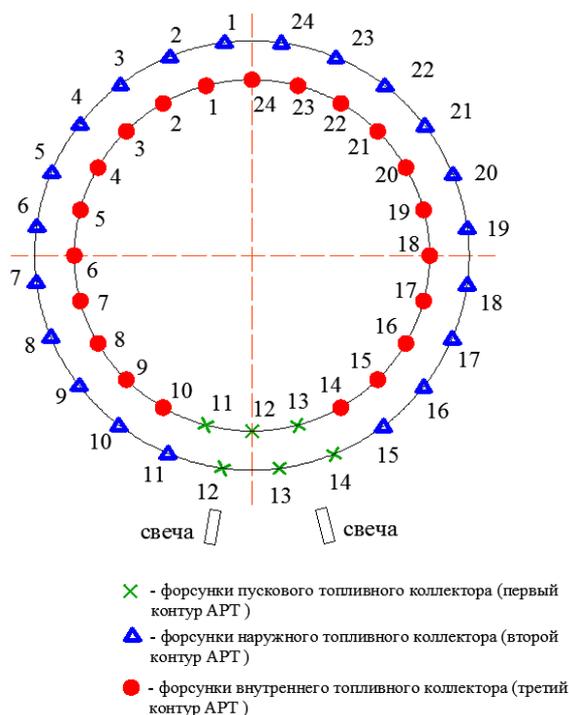


Рис. 3. Схема 3-коллекторной системы подачи топлива в ПКС

Сравнительные испытания полно-размерной камеры сгорания проведены на 6 пусковых форсунках каждого типа. Схема подключения коллекторов и расположения пусковых форсунок и свечей зажигания показана на рис. 3. В испытаниях запуск проводился лишь от одной свечи, расположенной по оси 12-й форсунки внешнего контура. Такая схема запуска была выбрана по результатам предварительных экспериментов как наиболее эффективная.

Испытания проводились на стенде УВ-13 ЦИАМ при четырёх разряжениях в камере сгорания 900; 700; 500; 400 кПа, что соответствует по давлению высотам 1, 3, 5 и 7 км (рис.4). Зажигание и срыв пламени контролировались при помощи видеокамеры, расположенной на выходе камеры сгорания. Режимные параметры записывались на ЭВМ параллельно с видеоизображением. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

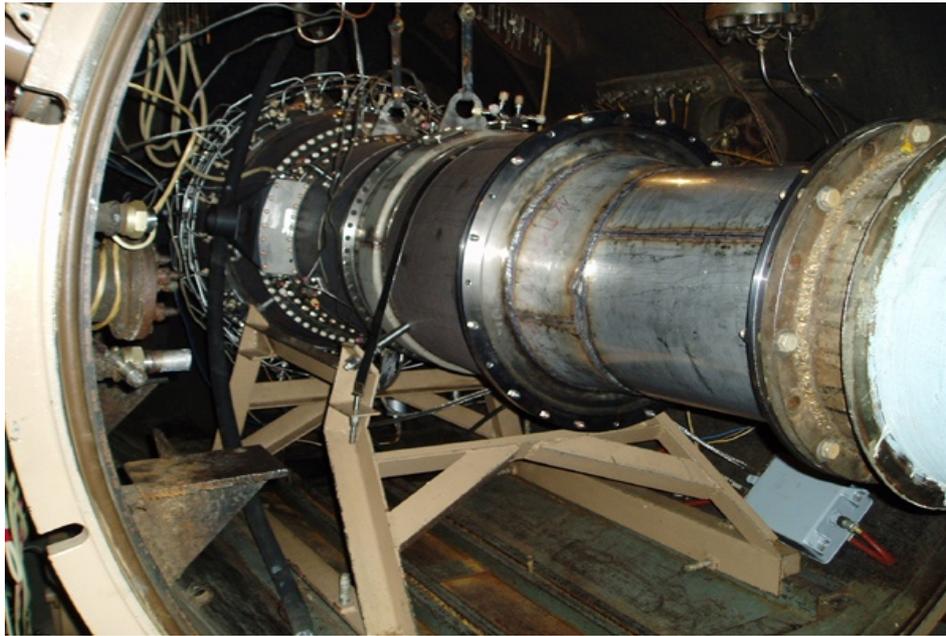


Рис.4. Установка ПКС на стенде УВ-13

Рассмотрение режима работы камеры, близкого к земному ($P_k=900$ кПа), необходимо начать с некоторого отступления. Визуально распыл топлива двумя типами форсунок отличается достаточно сильно. На кадрах видеоизображения, полученных с выхода камеры сгорания, для форсунок исходной схемы отчётливо видны отдельные вылетающие крупные капли (рис.5). Большинство же таких капель до момента воспламенения осаждается на стенках камеры сгорания, стекает в нижнюю её часть, заполняя её с течением времени до уровня свечи, и воспламеняется от очередного разряда. Таким образом,

камера сгорания в некоторых точках запускается не от работающего фронтального устройства, а от налива топлива. Этим объясняется наличие отдельных точек запуска непосредственно вблизи границы бедного срыва, а иногда и за её пределами. Особенно это проявляется на малых высотах 1-3 км. Поэтому можно утверждать, что область реального запуска от фронтального устройства для исходного варианта камеры крайне мала и определяется для высот 1-3 км сгущением экспериментальных точек вблизи $\alpha_{\Sigma}=6$, а к высоте 7 км сужается до малой области вблизи $\alpha_{\Sigma}=3$.



Рис. 5. Кадры видеоизображения, полученные с выхода камеры сгорания для форсунок исходной схемы (слева - режимные параметры)

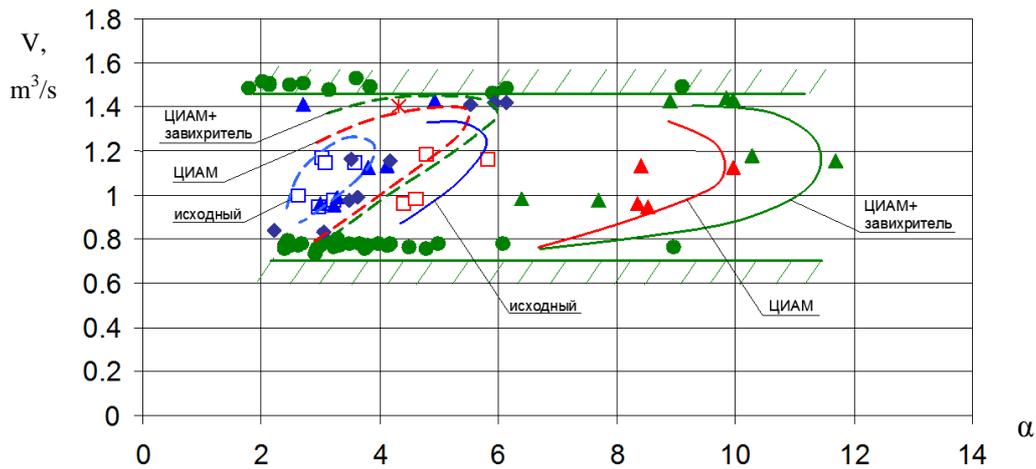


Рис. 6. Границы запуска (пунктирная линия) и бедного срыва (сплошная линия) кольцевой полноразмерной МКС для 2 вариантов пусковых форсунок при имитации высоты полёта $H=9$ км.
Вариант исходный; Вариант ЦИАМ; Вариант ЦИАМ с новым завихрителем

Граница зажигания имеет однозначный и чётко очерченный вид. Правая граница области зажигания в данном случае, как и положено, сдвигается с увеличением высоты в область меньших α (рис.6). Если при земном запуске она достигает величины $\alpha_{\Sigma}=15$, то к высоте 7 км достигает значения 5, что практически в два раза больше, чем для исходного варианта. При этом, по сравнению с исходным вариантом, она ещё и увеличивается на 20% по объёмному расходу, достигая величину $1,43 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для новых пусковых форсунок пневматического типа такого недостатка, как наличие крупных капель, не обнаружено, вследствие чего было значительно

уменьшено нагарообразование на фронтальных экранах по сравнению с исходными форсунками. На рис. 7 приведена фотография фронта полноразмерной камеры сгорания после огневых испытаний, где отчётливо видно образование сажи на поверхности экрана фронтальной плиты №3 для исходной форсунки. Тем самым, сравнивая два различных форсуночных модуля, расположенных друг рядом с другом по наружному контуру камеры и непрерывно работающих во время запуска, можно невооружённым глазом увидеть разницу по цвету поверхности экрана после завершения испытаний (слева исходный вариант с нагаром, справа новый вариант без нагара).



Рис.7. Сравнение нагарообразования на фронтальных экранах (слева - исходный вариант, справа - новый)

Граница бедного срыва также значительно расширена для варианта с новыми форсунками. Если при земном запуске величина границы срыва пламени по α_{Σ} даже несколько шире для исходного варианта, равного 29 против 25 (обе границы значительно превышают требуемую по техническому заданию величину $\alpha_{\Sigma}=12$), то уже к высоте 5 км ситуация изменяется на противоположенную: для исходного варианта граница бедного срыва достигает величины 7,2 по α_{Σ} для исходного варианта и $\alpha_{\Sigma}=10$ – для нового варианта. На высоте 7 км граница ещё более расширяется – $\alpha_{\Sigma}=6$ для исходного варианта, $\alpha_{\Sigma}=10$ – для варианта ЦИАМ.

Заключение

ПКС, оснащённая новыми форсунками пневматического типа производства ЦИАМ, показала лучшие результаты по границам зажигания и бедного срыва

практически на всех высотах по сравнению с исходным вариантом. Выявлено снижение нагарообразования на фронтальных экранах, что характеризуется отсутствием крупных капель, оседающих на экранах фронтальной плиты и стенках жаровой трубы. Таким образом, экспериментальным путём подтверждено, что использование новых форсуночных модулей в ПКС в условиях высотного запуска расширяет пределы устойчивого горения и обеспечивает уверенный розжиг.

Библиографический список

1. Васильев, А.Ю. Разработка и исследование пневматической форсунки применительно к малоэмиссионной камере сгорания перспективного ГТД [Текст] / А.Ю. Васильев, О.Г. Челебян, В.И. Ягодкин // Вестн. СГАУ, 2011. – №5(29). – С. 65-71.

DEVELOPMENT OF PNEUMATIC- TYPE STARTING NOZZLES FOR A FULL-SCALE LOW EMISSION COMBUSTION CHAMBER

© 2013 A. J. Vasilyev, P. I. Blumkin, O. G. Chelebyan

Central Institute of Aviation Motors named after P. I. Baranov (Moscow)

To provide stable operation and confident firing up in the main combustion chamber of a gas turbine engine under high-altitude flight conditions a new scheme of a pneumatic- type starting nozzle is developed. The firing tests carried out in a full-scale low-emission combustion chamber showed their principal fitness for work. The results of the experimental study of two versions of starting nozzles for the purpose of determining comparative starting and stalling characteristics at different heights are presented in the paper..

Combustion chamber, low-emission chamber, starting nozzle, air swirler, fuel-air mixture, flammability range, flameout, exhaust emission.

Информация об авторах

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

Блюмкин Павел Исаакович, начальник стенда, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва (ЦИАМ). Область научных интересов: камеры сгорания.

Челебян Оганес Грачьяевич, младший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва (ЦИАМ). E-mail: oganeschelebyan@mail.ru. Область научных интересов: камеры сгорания, распыливание топлива, пневматические форсунки.

Vasiliev Aleksandr Yurievich, Candidate of Sciences (Engineering), Head of Sector, CIAM. E-mail: vasiliev@ciam.ru. Area of research: combustion chambers, combined sprayer modules, pneumatic nozzles, flow visualization.

Blumkin Pavel Isaacovich, Head of the Test Bed, CIAM. Area of research: combustion chambers.

Chelebyan Oganesh Grachyaevich, Junior Researcher, CIAM. E-mail: oganeschelebyan@mail.ru. Area of research: combustion chambers, fuel atomization, pneumatic nozzles.