

УДК 621.452.3

## ИСПЫТАНИЯ ОТСЕКА МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ЦЕНТРОБЕЖНОЙ И ЦЕНТРОБЕЖНО-ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКАМИ

©2011 В. П. Маслов, Н. П. Машинистова, А. А. Свириденков, В. И. Ягодкин

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

С целью улучшения экологических и ресурсных характеристик существующих ТРДД гражданской авиации разработан фронтальной модуль камеры сгорания с комбинированной центробежно-пневматической форсункой.

Экспериментально подтверждены высокая полнота сгорания топлива, удовлетворительный диапазон устойчивого горения, малая эмиссия несгоревших углеводородов, оксида углерода и снижение эмиссии оксидов азота в модифицированном варианте камеры сгорания с комбинированной форсункой.

*Камера сгорания, форсунка, факел распыливания, эмиссия.*

Разработка камер сгорания современной кольцевой схемы с улучшенными экологическими и ресурсными характеристиками является актуальной задачей. Основным элементом фронтального модуля, определяющим экологические и ресурсные характеристики камеры сгорания, является форсунка. В серийных двигателях обычно используются центробежные двухканальные форсунки. Их недостатком является невозможность получения мелкодисперсной однородной смеси при низких давлениях подачи топлива.

Камеры сгорания ГТУ и РД работают в широком диапазоне изменения расхода топлива. Так, например, у воздушно-реактивного двигателя при переходе с режима максимальной тяги у земли на режим сильного дросселирования на большой высоте расход топлива уменьшается до 30 раз. В простой центробежной форсунке расход топлива приблизительно равен корню квадратному из перепада давления на форсунке, так что для увеличения расхода топлива в 30 раз требуется увеличить перепад давления в 900 раз. Применяемые в настоящее время топливные насосы обеспечивают максимальное давление перед форсунками, примерно равное 7.5-8 МПа. Это давление не может быть повышено без усложнения и утяже-

ления топливной аппаратуры и уменьшения её надёжности. Если максимальное давление подачи составляет 7.5-8 МПа, то для уменьшения расхода в 30 раз необходимо снизить давление до 8-9 кПа. Но при столь низком давлении топливная струя, вытекающая из форсунки, уже практически не распадается на капли, образуя струю или пузырь. Очевидно, что простые струйные и центробежные форсунки в интервале давления от 0.008-0.009 до 7.5-8.0 МПа не могут обеспечить требуемого диапазона изменения расхода топлива.

Следовательно, возникает потребность в создании форсунок, у которых расход топлива с увеличением давления подачи возрастает быстрее, чем у известных. То есть требуемый диапазон изменения расхода должен достигаться в сравнительно узком интервале давлений подачи при заданном качестве распыла.

Известно решение проблемы регулирования путём перепуска топлива из камеры закручивания в бак или на вход насоса [1]. Основные преимущества и недостатки этого метода описаны в ряде работ по распыливанию жидкостей [2, 3]. Преимуществом является расширение диапазона изменения расхода жидкости и увеличение геометрической характеристики форсунки при малых расходах топ-

лива и, соответственно, улучшение качества распыливания. Из недостатков отмечается изменение угла факела распыливания с увеличением степени перепуска, а также возвратный поток топлива.

В ЦИАМ разработан фронтальный модуль камеры сгорания, в котором центробежная двухканальная форсунка заменена комбинированной центробежно-пневматической форсункой (рис.1) с уменьшенным давлением топливоподдачи [4].



Рис.1 Фотография центробежно-пневматической форсунки

В работе приведены результаты измерения размеров, концентрации и скорости капель в факеле распыливания за форсункой в модельных условиях. Проведены экспериментальные исследования прототипа фронтального модуля в жаровой трубе в земных условиях при давлении  $P_k=320-600$  кПа и температуре  $T_k=430-650$  К воздуха с целью получения предварительных основных экологических характеристик разрабатываемой кольцевой камеры.

При запуске камеры при малом перепаде давлений топлива и воздуха работают пусковой центробежный и нерегулируемый пневматический каналы в конце центробежной камеры закручивания. Струи топлива из пускового канала проходят вблизи кромки общего сопла, не касаясь её. В комбинированной форсунке пневматические каналы работают на перепускаемом топливе в потоке воздуха, поступающем в корпус форсунки от набегающего потока на входе камеры сгорания, соответственно, с внешним и внутренним смещением горючей смеси. Совместная работа центробежного и пневматического каналов позволяет раскрыть факел распыливания, уменьшить толщину

плёнки топлива и размеры капель в центре факела, что облегчает воспламенение. На режиме малого газа через клапан подключается вторая ступень перепуска в кромки лопаток завихрителя воздуха. Дальнейшее повышение давления топлива увеличивает его расход через все каналы, в основном через пневматические, а увеличение числа оборотов двигателя увеличивает перепад давлений воздуха и качество распыливания (мелкость и равномерность), что улучшает эмиссионные характеристики двигателя на взлётном и крейсерском режимах.

Для измерений основных характеристик распыливания и скоростей групп размеров капель использовалась аппаратура фирмы TSI. Параметры факела распыливания измерялись фазодоплеровским измерителем скоростей и размеров частиц. Измерения проводились в поперечной плоскости факела на расстоянии 43 мм от выхода форсунки.

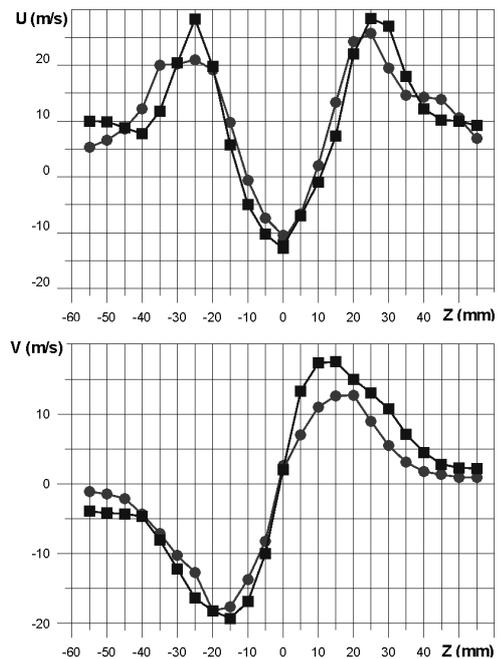


Рис.2 Распределения продольной  $U$  и окружной  $V$  компонент скорости за серийной и центробежно-пневматической форсунками:

· - серийная форсунка,  
■ - комбинированная форсунка

На рис.2 приведены распределения осевой  $U$  и тангенциальной  $V$  компонент скорости капель за серийной и центро-

бежно-пневматической форсунками при расходе топлива 5 г/с и перепаде давления на фронтном устройстве 3 кПа.

Как видно из приведённого графика, при подаче распыливающего воздуха через завихритель капли ускоряются и приобретают окружную компоненту скорости. В центре факела отчётливо наблюдается зона возвратного течения. Значения скоростей капель в обратном токе достигают 50% скорости в прямом токе.

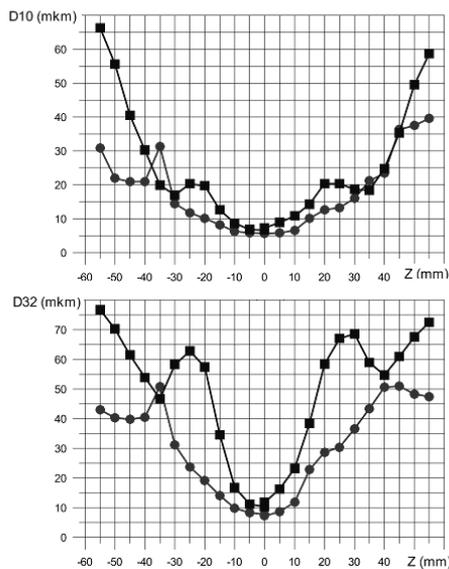


Рис.3 Распределения размеров капель за серийной и центробежно-пневматической форсунками:

· - серийная форсунка,  
■ - комбинированная форсунка

Распределения размеров капель для этого режима работы показаны на рис.3. В центре факела размеры капель одинаковы для обеих форсунок. На периферии размеры капель больше при распыливании комбинированной форсункой. Это связано с перетеканием части топлива в пневматический канал форсунки, в результате чего при малых расходах топлива из внешнего сопла форсунки вытекают нераспавшиеся струйки, а также с тем, что в серийной форсунке в данных экспериментах открыт только центральный канал и распыливание при одинаковых расходах топлива идет при большем давлении подачи топлива.

Распределения объёмной концентрации топлива для этих условий экспе-

римента показаны на рис.4. Основное отличие в распределении концентрации заключается в увеличении концентрации капель на периферии факела, что должно способствовать поджиганию топливоздушнoй смеси.

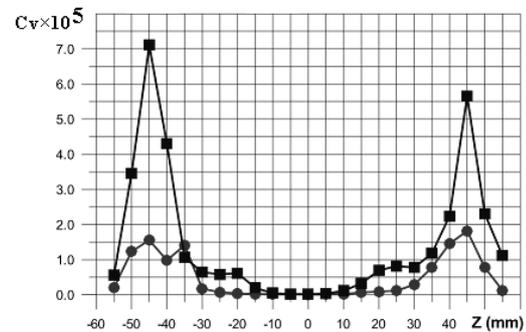


Рис. 4 Распределения объёмной концентрации топлива за серийной и центробежно-пневматической форсунками:

· - серийная форсунка,  
■ - комбинированная форсунка

При увеличении расхода топлива через форсунку до 32 г/с наблюдается заметное уменьшение скорости капель в обратном токе для серийной форсунки до 5 м/с и незначительное уменьшение скорости до 10 м/с для комбинированной форсунки. Большая скорость капель в обратном токе на оси факела распыливания будет способствовать стабилизации горения топливоздушнoй смеси.

На стенде ЦИАМ проведены сравнительные испытания отсека с серийной и модифицированной форсунками в составе фронтного устройства камеры сгорания в земных условиях при давлении в отсеке камеры  $P_k=330-600$  кПа, объёмном расходе воздуха  $G_k=0.16-0.5$  м<sup>3</sup>/с с температурой на входе в отсек  $T_k=430-650$  К с целью получения предварительных экологических и основных характеристик разрабатываемой кольцевой камеры сгорания. По результатам испытаний камеры сгорания в составе одnogорелочного отсека определялись эффективность сгорания топлива, экологические характеристики, условия запуска камеры сгорания, диапазон устойчивой работы и другие характеристики.

Для измерения состава продуктов сгорания использовался комплект быстродействующих газоанализаторов фирмы «Бекман» (США). Пробы газов отбирались в мерном участке отсека камеры сгорания с помощью осредняющих пробоотборников и поступали к анализаторам «Бекман», обогреваемым до температуры 435 К (требование ИКАО) магистральям.

В соответствии с требованием стандарта ИКАО проведена проверка представительности отобранных для химического анализа проб газов. С этой целью проведено сравнение коэффициентов избытка воздуха, определённых по замерам расходов воздуха и топлива и с помощью химического анализа. Результаты подтвердили требуемую представительность проб газов в пределах 10%.

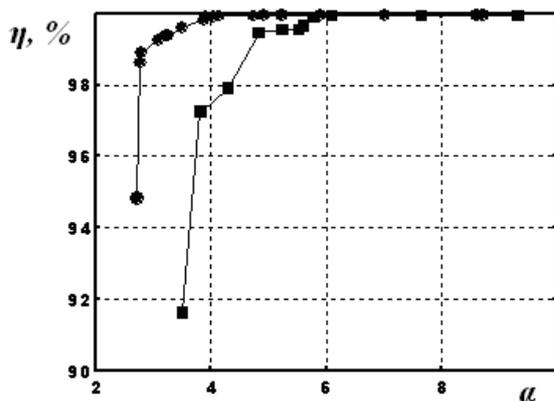


Рис.5 Зависимость полноты сгорания  $\eta$  топлива от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в отсеке камеры сгорания:  
 · - серийная форсунка,  
 ■ - комбинированная форсунка

На рис.5 приведены результаты измерения полноты сгорания топлива, распыливаемого серийной и центробежной форсунками. При коэффициенте избытка воздуха меньше 5 полнота сгорания за серийной форсункой выше, чем за комбинированной. Это связано с недостаточностью дробления капель на периферии факела распыла (рис.3) при небольших расходах распыливающего воздуха. Следует учесть также, что перепад давления подачи топлива в испытаниях на центробежно-пневматической форсунке был в 4 раза

меньше, чем на исходной форсунке, так как основная часть топлива в исходной форсунке подавалась через первый канал. Отношение коэффициента расхода топлива комбинированной форсунки к коэффициенту расхода топлива первого канала исходной форсунки превышало 10.

Проведённые испытания показали, что экологические характеристики по уровню выбросов в атмосферу CO, NOx, при работе отсека с комбинированной форсункой не хуже, чем с исходной форсункой. На рис.6 приведены результаты измерения выбросов оксидов азота. Эмиссия окислов азота за центробежно-пневматической форсункой оказалась ниже, чем для исходной форсунки.

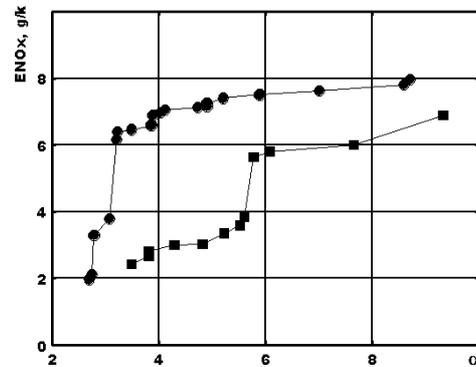


Рис.6 Зависимость эмиссии окислов азота от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в отсеке камеры сгорания:  
 · - серийная форсунка,  
 ■ - комбинированная форсунка

### Заключение

С целью улучшения экологических и ресурсных характеристик существующих ТРДД гражданской авиации разработан фронтальный модуль камеры сгорания с комбинированной центробежно-пневматической форсункой.

Выполнена экспериментальная отработка конструкции форсунки в модельных условиях. Проведены сравнительные испытания отсека камеры сгорания с серийной и модифицированной форсунками с целью получения предварительных экологических и основных характеристик разрабатываемой кольцевой камеры сго-

рания. Экспериментально подтверждены высокая полнота сгорания топлива, удовлетворительный диапазон устойчивого горения, малая эмиссия несгоревших углеводородов, оксида углерода и снижение эмиссии оксидов азота в модифицированном варианте камеры сгорания.

### Библиографический список

1. Кулагин, Л.В. Форсунки для распыливания тяжелых топлив [Текст]/ Л.В. Кулагин, М.Я. Морошкин. - М.: Машиностроение, 1973.- 200 с.

2. Распыливание жидкостей [Текст]/ В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко

[и др.] - М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.

3. Лефевр, А.Н. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст]/ А.Н. Лефевр; пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 556 с.

4. Пат. 2374561 Российская Федерация. Центробежно-пневматическая форсунка [Текст]/ В.И. Ягодкин, В.В. Бородако, А.Ю. Васильев [и др.], опубл. 27.11.09.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект №07-08-00573.

## TESTS OF THE LOW EMISSION COMBUSTION CHAMBERS COMPARTMENT WITH PRESSURE AND PRESSURE-AIR ASSIST ATOMIZERS

©2011 V. P. Maslov, N. P. Mashinistova, A. A. Sviridenkov, V. I. Yagodkin

Central Institute of Aviation Motors (Moscow)

For the purpose of improvement of ecological and resource characteristics of the existing civil aircraft a front module of a combustion chamber with a combined centrifugal air-atomizing burner is developed. High completeness of fuel combustion, satisfactory range of steady burning, low emission of unburned hydrocarbons, carbon oxide and reduced emission of nitric oxide in the modified version of a combustion chamber with a combined atomizer is experimentally confirmed.

*Combustion chamber, sprayer, atomizer spray, emission.*

### Информация об авторах

**Маслов Владимир Павлович**, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: [vorobeev@ciam.ru](mailto:vorobeev@ciam.ru). Область научных интересов: диагностика потоков оптическими методами.

**Машинистова Наталья Петровна**, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. Область научных интересов: автоматизированное проектирование камер сгорания авиационных ГТД.

**Свириденков Александр Алексеевич**, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: [sviriden@ciam.ru](mailto:sviriden@ciam.ru). Область научных интересов: распыливание жидкости, оптические методы исследования факелов распыливания, численные методы решения задач гидродинамики.

**Ягодкин Виктор Иванович**, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: [yagodkin@ciam.ru](mailto:yagodkin@ciam.ru). Область научных интересов: распыливание жидкости, оптические методы исследования факелов распыливания, разработка новых типов форсунок.

**Maslov Vladimir Pavlovich**, the Federal State Unitary Enterprise Central Institute of aviation engine production named after P. I. Baranov (FGUP CIAM), chief of sector, e-mail: [vorobeev@ciam.ru](mailto:vorobeev@ciam.ru). Area of research: diagnostics of flows by optical methods.

**Mashinistova Natalia Petrovna**, the Federal state unitary enterprise the Central institute aviation engine production of P.I.Baranova (FGUP CIAM), leading engineer. Area of research: computer-aided design of combustion chambers of aviation gas-turbine engines.

**Sviridenkov Alexander Alekseevich**, the Federal state unitary enterprise the Central institute aviation engine production of P.I.Baranova (FGUP CIAM), leading engineer, e-mail: [sviriden@ciam.ru](mailto:sviriden@ciam.ru). Area of research: atomization of liquids, optical methods of spray research, numerical methods of solving hydrodynamics problems.

**Jagodkin Victor Ivanovich**, Cand.Tech.Sci., the Federal state unitary enterprise the Central institute, aviation engine production of P.I.Baranova (FGUP CIAM), chief of sector, e-mail: [yagodkin@ciam.ru](mailto:yagodkin@ciam.ru). Area of research: atomization of liquids, optical methods of spray research, design of new types of injectors.