

## КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРОЙ И ТАРЕЛЬЧАТЫМ СОПЛОМ

Канд. техн. наук Горохов В.Д., Лобов С.Д., Пронякин М.И.

Представлены обзор, результаты и планы работ КБХА по маршевым кислородно-водородным двигателям с кольцевой камерой и тарельчатым соплом для верхних ступеней, разгонных блоков и межорбитальных буксиров перспективных ракет-носителей.

К маршевым двигателям для верхних ступеней, разгонных блоков (РБ) и межорбитальных буксиров (МБ) предъявляются особые требования, основные из которых:

- высокие удельные габаритно-массовые и энергетические характеристики;
- высокая надежность и безаварийность;
- универсальность для ракет-носителей (РН) различных классов;
- многократность использований и включений в полете.

Как показывает предварительный анализ и опыт многолетней успешной эксплуатации двигателей семейства RL-10 разработки фирмы Pratt & Whitney (ныне - отделение United Technologies Corporation), США, этим во многом противоречивым требованиям в наибольшей степени соответствуют двигатели, выполненные по безгазогенераторной схеме.

Схемы без газогенератора обеспечивают:

- более высокий уровень надежности и особенно безаварийности, а также увеличенный ресурс двигателя из-за простоты схемы, низкой температуры газа перед турбинами турбонасосных агрегатов (ТНА) и исключения "пиков" температур на запуске, выключения и при дефектах системы подачи;
- возможность существенного увеличения количества включений из-за отсутствия паров воды во внутренних полостях ТНА, а следовательно, и исключения случаев их замерзания при повторных включениях, особенно в условиях космоса;
- возможность организации запуска двигателя при низких давлениях в баках;
- уменьшение затрат материальной части на отработку.

В двигателях, выполненных по схеме без газогенератора, для привода турбин ТНА используется водород, подогретый в охлаждающем тракте камеры. Чем выше температура водорода, тем выше работоспособность газа и полнота сгорания, а следовательно, тем большее давление в камере сгорания и более высокие удельные характеристики можно реализовать в двигателе.

Большого подогрева в тракте охлаждения камеры компонента-охлаждителя можно достичь, увеличивая теплообменную поверхность тракта. Однако это увеличивает как размеры камеры, так и гидравлическое сопротивление тракта, что приводит к снижению давления в камере сгорания. Эта проблема значительно облегчается при использовании кольцевой камеры с тарельчатым соплом.

Привлекательность идеи создания двигателя с кольцевой камерой и тарельчатым соплом по сравнению с использованием традиционной цилиндрической камеры сгорания с соплом Лавала заключается также в возможностях значительного снижения массы и длины двигателя при одинаковом удельном импульсе тяги или повышении удельного импульса при одинаковой длине и проведения огневых стендовых испытаний высотных двигателей без специальных устройств (газодинамические трубы), имитирующих объектные условия. Однако реализация этой идеи в ракетном двигателестроении до последнего времени сдерживалась сложностью конструктивного и технологического исполнения такой камеры и отсутствием проектно-экспериментальных данных по эффективности ее применения.

В 1993 году КБХА как головной исполнитель совместно с ИЦ им. М.В. Келдыша и

РНЦ "Прикладная химия" по техническому заданию РКК "Энергия" им. С.П. Королева развернуло работы по созданию кислородно-водородного двигателя с кольцевой камерой и тарельчатым соплом. Работа была завершена выпуском технического предложения по двигателю РО97 тягой 39,2 кН (4 тс) для РБ и МБ.

Разработке технического предложения предшествовали поисковые работы, проведенные РКК "Энергия", ЦНИИМАШем, ИЦ им. М.В. Келдыша, 4-м ЦНИИ МО и КБХА, по обоснованию оптимальных тяги и области использования двигателя, определению его технического облика.

Разработка двигателя для РБ и МБ малой тяги с нетрадиционной камерой, выполненного по новой как для КБХА, так и для конструкторских бюро СССР и России, безгазогенераторной схеме, потребовала решения многочисленных проблемных вопросов по всем его элементам и этапам создания. Тем не менее высококвалифицированные кадры, опыт и задел научно-технических и производственных разработок позволили коллективу КБХА совместно с представителями родственных предприятий успешно их решить.

Работы были начаты под руководством главного конструктора темы Рачука В.С. и ведущего конструктора темы Никитина Л.Н.

Основная нагрузка пришла на разработчиков основного узла любого двигателя, а в данном случае узла определяющего - камеры (стендовый вариант натурной кольцевой камеры - СВНKK - приведен на рис. 1). Критическое сечение в виде щели шириной 5,6 мм, стабильность его при изготовлении и испытаниях, необходимость организации горения и "пристеночного" охлаждающего слоя в камере кольцевого типа с шириной кольца 30 мм, оптимальная разводка охладителя с расходом всего 1,2 кг/с, радиационно охлаждаемый сопловой насадок из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). И это при десятикратных использованиях и включении в полете при ресурсе в 5400 с, да еще и с качанием. Несмотря на новизну и необычность этих задач, конструкторы камеры (Горохов В.Д., Лобов С.Д. и др.) вместе со специалистами смежных подразделений и прежде всего с представителями расчетного отдела (Орлов В.А., Макаревич А.Н., Конопатова Е.А.), технологами (Лобода А.И., Мамонтова Н.М.) и специалистами по сварке (Педан С.В.) с честью справились с указанными проблемами. Была разработана оригинальная конструкция камеры сгорания с многослойным пакетом цилиндрических оболочек, соединенных пайкой по фрезерованным ребрам припоями с различной температурой плавления, и оригинальной форсуночной головкой. Проектные решения по проблемам камеры уже подтвердили свою правильность при огневых испытаниях СВНKK.

Низкие входные давления компонентов, сравнительно малые их расходы при тех же жестких требованиях по ресурсу и многоразовости вынудили разработчиков агрегатов системы подачи предложить высокооборотные раздельные турбонасосные агрегаты ТНАО и ТНАГ (100 тыс. об/мин у ТНАГ) с применением упругодемпферных опор, двухкаскадный бустерный ТНА окислителя (БТНАО), решения по которым нашли воплощение в других разработках и которые еще необходимо доводить.

Дроссель и регулятор на газообразном водороде с температурой до 730 К, пневмоклапаны с сильфонными приводами для сохранения гелия, малогабаритные запальные устройства и средства измерения, система контроля и управления двигателя (СКУМД) на новой элементной базе, разработка двигателя тягой 44,1 кН (4,5 тс) при необходимых 39,2 кН (4 тс) для обеспечения требуемого уровня надежности и др. - вот далеко не полный перечень нетрадиционных решений, предложенных при разработке двигателя РО97 (макет с индексом РД0126 приведен на рис. 2).

Основные технические данные двигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Номинальная тяга в пустоте, кН (тс)	39,2 (4)
Удельный импульс тяги в пустоте, м/с (кгс · с/кг)	4664,8 (476)
Номинальное массовое соотношение компонентов топлива	6

1	2
Давление в камере, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	7,16 (73)
Номинальное давление компонентов топлива на входе в двигатель	давление насыщенных паров (p <sub>s</sub> )
Номинальная температура компонентов топлива на входе в двигатель, К:	
окислителя	95
горючего	21
Количество включений в одном полете, не более	10
Кратность использования в составе блока, не более	10
Угол качания камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, ...°	±7
Продолжительность работы на основном режиме, с, не более:	
суммарная	5400
максимальная за одно включение	1800
минимальная за одно включение	1
Вероятность безотказной работы при доверительной вероятности 0,9, не менее:	
к началу летных испытаний	0,995
к началу эксплуатации	0,999
Масса "сухого" двигателя, кг	350
Габаритные размеры двигателя, мм:	
длина	2210
диаметр	1590

Двигатель имеет возможность работы на "вытеснительном" режиме, на котором ТНАО, ТНАГ, БТНАО и БТНАГ не работают, тяга на этом режиме 284,2 Н (29 кгс), а также на "бустерном" режиме - не работают ТНАО и ТНАГ, тяга 676,2 Н (69 кгс).

Двигатель обеспечивает наддув баков горючего и окислителя газообразными водородом и кислородом соответственно, а также подачу газообразных водорода и кислорода на двигатели реактивной системы управления - два блока по три двигателя тягой 98 Н (10 кгс) в каждом.

Двигатель запускается через режим малой тяги (РМТ), выключается через режим конечной ступени тяги (КСТ). Уровень тяги на РМТ и КСТ - 9,8 кН (1 тс) при массовом соотношении компонентов топлива 4.

Двигатель представляет собой однокамерный блок. Усилие тяги передается раме блока через карданный подвес, обеспечивающий с помощью рулевых машин качание двигателя в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Упрощенная пневмогидравлическая схема двигателя представлена на рис. 3.

С 1993 года в КБХА по контракту с РКА (ныне Росавиакосмос) в рамках научно-исследовательской работы (НИР) РД0126 уже под руководством главного конструктора Горохова В.Д. и ведущего конструктора темы Липлявого И.В. продолжались работы по созданию кислородно-водородного ЖРД с кольцевой камерой сгорания и тарельчатым соплом. Были проведены следующие работы.

1. Разработана конструкторская документация на СВНKK, агрегаты автоматики и регулирования.

2. Проведены исследования на модельных установках:

- процессов воспламенения, смесеобразования и охлаждения на режимах запуска и глубокого дросселирования;
- работоспособности малогабаритного запального устройства форкамерного типа при избытке окислителя;
- характеристик подшипников и демпферных опор ТНА в имитаторах на натуральных компонентах.

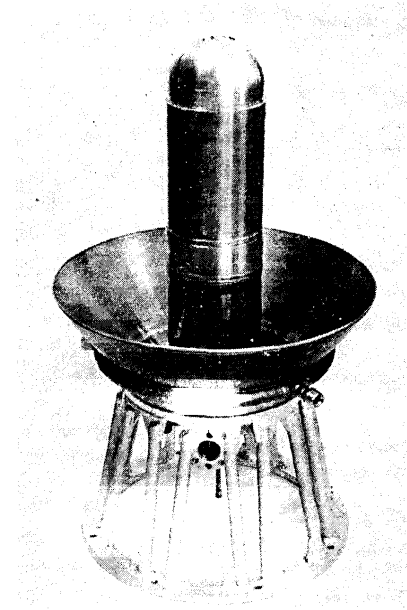


Рис. 1. Стендовый вариант натурной кольцевой камеры

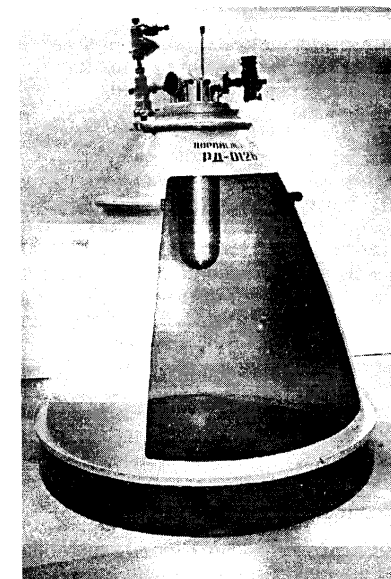


Рис. 2. Макет двигателя

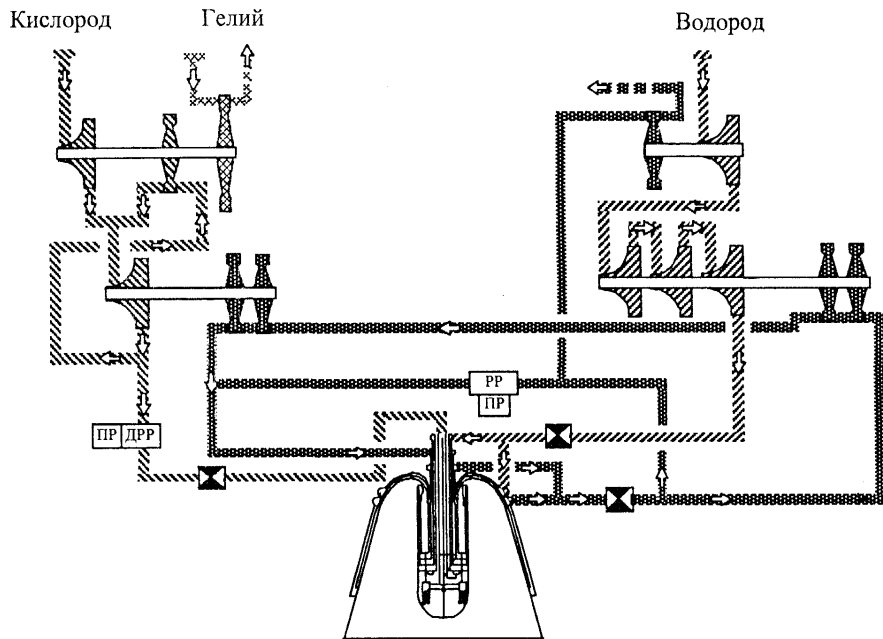


Рис. 3. Упрощенная пневмогидравлическая схема двигателя

3. Разработана конструкторская документация и изготовлено модельное сопло с центральным телом для исследования условий отрыва потока.

В 1997-1998 годах усилия были сконцентрированы на создании СВНКК. При этом были проведены следующие работы:

- изготовлено два экземпляра СВНКК без высотного сопла и натурное запальное устройство;
- изготовлена материальная часть для подготовки стенда к испытаниям, дооборудован стенд № 5 НИО 121 Экспериментального завода для огневых испытаний СВНКК;
- проведены технологические испытания камеры;
- проведены испытания запальных устройств;
- в августе 1998 г. проведено четыре успешных огневых испытания СВНКК на жидком кислороде и газообразном водороде продолжительностью 20-30 с при давлении в камере 3,4 - 7,2 МПа (35 - 73 кгс/см<sup>2</sup>) и массовом соотношении компонентов топлива 4 - 6,4 с целью подтверждения ее работоспособности.

Анализ результатов испытаний и осмотра матчасти подтвердил правильность основных решений, заложенных в конструкцию камеры.

В 1997 году проведены оценочные расчетно-проектные работы по кислородно-водородному двигателю тягой 196 кН (20 тс), выполненному также по безгазогенераторной схеме в вариантах со сдвижным радиационно охлаждаемым насадком и без него. Материалы по такому двигателю были предложены фирме Pratt & Whitney для обсуждения планов проведения совместных работ.

На заседании коллегии РКА 08.04.98 с учетом созданного в рамках выполнения НИР "Ястреб" научно-технического задела работы, проводимые по этой теме, были отнесены к перспективному направлению развития отечественного ракетного двигателестроения.

Нетрадиционный вид камеры и привлекательные ожидаемые характеристики двигателя, а также настойчивость руководства КБХА не позволяют забывать о двигателе и

Росавиакосмосу, и коллегам-ракетчикам. "Просматривали" его и в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, и в РКК "Энергия" им. С.П. Королева.

Работы по теме "Ястреб" продолжаются.

В 1999-2000 годах из РКК "Энергия" им. С.П. Королева поступил и был выполнен запрос об оценке возможности улучшения характеристик двигателя.

Макет двигателя экспонировался на выставке "Аэрокосмос-2000", проходившей в Москве на территории ВВЦ. Планируется "полет" "Ястреба" и в Ле-Бурже.

Прорабатывается вопрос использования "безотрывности" истечения продуктов сгорания из тарельчатого сопла для огневых испытаний неохлаждаемых насадков "высотного" двигателя РД0146 в "земных" условиях.

В рамках НИР "Ястреб-3" в 2000 году продолжались работы по камере.

Тематической карточкой на НИР "Ястреб-4" в 2001-2003 годах планируется завершение этапа научно-исследовательских работ и переход к опытно-конструкторским. Прежде всего предполагается с участием ИЦ им. М.В. Келдыша завершить решение проблемных вопросов по камере. Есть идеи по совершенствованию схемы. Не совсем удачной выглядит в свете сегодняшних требований компоновка двигателя. Напршивается использование пространства в районе центрального тела. Работы по решению этих вопросов и планируются на ближайшие годы.

Наступило новое тысячелетие, на предприятие приходят новые люди, меняются экономические условия, появляются и воплощаются в жизнь новые идеи. И есть надежда на то, что в нашей стране наступят лучшие времена и мы будем иметь возможность наблюдать "Ястреб" летающим.