

МОДЕРНИЗАЦИЯ АГРЕГАТОВ ПОДАЧИ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ РД0120

Д-р техн. наук А.В. Иванов, канд. техн. наук А.И. Дмитренко

В современных ракетах-носителях (РН) и ЖРД в качестве экологически чистых компонентов топлива используют кислород, керосин, водород, метан. В рамках решения задач по созданию РН тяжелого и сверхтяжелого класса актуальной задачей является создание мощного кислородно-водородного двигателя с тягой не менее 200 тс. Самый мощный кислородно-водородный ЖРД, созданный в нашей стране – РД0120, использовавшийся в ракете-носителе «Энергия». Периодически поднимается вопрос возможности и целесообразности восстановления его производства. В статье рассмотрены возможные направления совершенствования агрегатов подачи этого двигателя, направленные на повышение работоспособности и упрощение конструкции.

Oxygen, kerosene, hydrogen and methane are used as environmentally friendly propellant components in modern launch vehicles (LV) and LRE. As part of solution of tasks of creating a heavy and superheavy LV, urgent task is to create a powerful oxygen-hydrogen engine with a thrust of at least 200 tf. The most powerful oxygen-hydrogen LRE created in our country is RD0120 LRE, which was used in Energia launch vehicle. The question of possibility and expediency of restoring its production is periodically raised. Possible ways to improve the feed units of this engine, aimed at improving performance and simplifying design are discussed in article.

Ключевые слова: агрегаты подачи, водород, кислород, турбонасосный агрегат, насос, турбина, ротор, подшипник.

Keywords: feed units, hydrogen, oxygen, turbopump unit, pump, turbine, rotor, bearing

Введение

В настоящее время Россия единственная страна, обладающая водородными технологиями, но при этом не имеющая находящихся в эксплуатации средств выведения с использованием водорода в качестве горючего. В СССР было создано три кислородно-водородных ракетных двигателей: КВД-1 (РД56), который был разработан в 1962-1974 годах в АО «КБ Химмаш им. А.М. Исаева»¹ для использования в составе ракеты-носителя Н-1, РД-57, разработанный АО «Люлька-Сатурн» в 1966-1974 годах для использования в составе ракеты-носителя Н-1, двигатель РД0120, разработанный АО КБХА в 1976-1987 годах для применения на второй ступени ракеты-носителя «Энергия», в России с 1998 года разрабатывается двигатель РД0146 в различных модификациях, но пока практического применения этот двигатель не нашел. Двигатель КВД-1 использовался в составе разгонного блока GSLV (Индия), двигатель РД0120 использовался в двух полетах ракеты-носителя «Энергия». Работы по двигателю РД0120 были прекращены в 1993 году.

Периодически двигатель РД0120 рассматривается для использования при создании новых средств выведения, при этом считается, что РД0120 – готовый двигатель, для использования которого необходимо только восстановить его производство. В 2015 году глава Научно-технического совета Роскосмоса Ю.Н. Коптев сообщил СМИ, что восстановление производства РД0120 займет 8-9 лет [1]. Проектирование двигателя РД0120 было начато в 1976 году. За 45 лет, прошедших после начала разработки двигателя РД0120, появились новые методики расчета и проектирования, новые технологии изготовления и новое понимание проблем, возникших при отработке ЖРД. Поэтому, в случае необходимости, восстановление производства двигателя РД0120 следует рассматривать как создание нового двигателя на базе отработанного прототипа с его глубокой модернизацией и перепроектированием ряда ключевых агрегатов, включая агрегаты подачи компонентов топлива.

¹ Приведены наименования предприятий по состоянию на март 2022 года

Система питания ЖРД РД0120

Двигатель РД0120 создавался как двигатель многократного использования, так как предполагалось его применение в составе полностью многоразовой второй ступени ракеты-носителя «Энергия-2» (рис. 1) [2], что требовало многократного включения, ремонтопригодности, отработки подходов к межполетному диагностированию и обслуживанию. Разработчикам ТНА потребовалось решить три новых задачи, не возникавших при создании ЖРД предшествующих разработок: обеспечить существенное повышение долговечности подшипников, повысить долговечность рабочих лопаток турбины и обеспечить ремонтопригодность агрегата. Еще одной проблемой, характерной для водородных ТНА было создание гибкого ротора с критическими частотами, находящимися ниже рабочей частоты вращения.

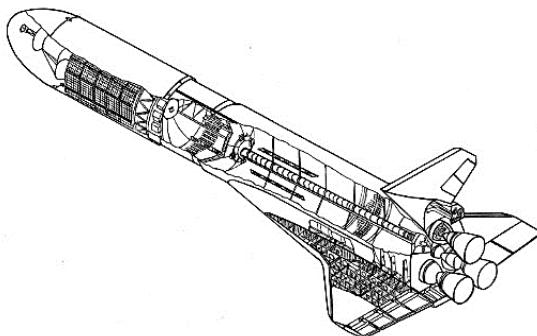


Рис. 1. Многоразовая вторая ступень РН «Энергия-2»

Агрегаты подачи двигателя РД0120 (упрощенная схема двигателя приведена на рис. 2) выполнены по типовой для российских двигателей схеме – с однороторным ТНА, но из-за уровня технологий, доступных для использования материалов не были достигнуты её потенциальные преимущества по экономичности и массе по сравнению с раздельными ТНА окислителя и горючего, примененными в двигателе RS-25 (SSME). Для обеспечения высоких антискавитационных качеств в состав двигателя включены бустерные турбонасосные агрегаты (БТНА) окислителя и горючего.

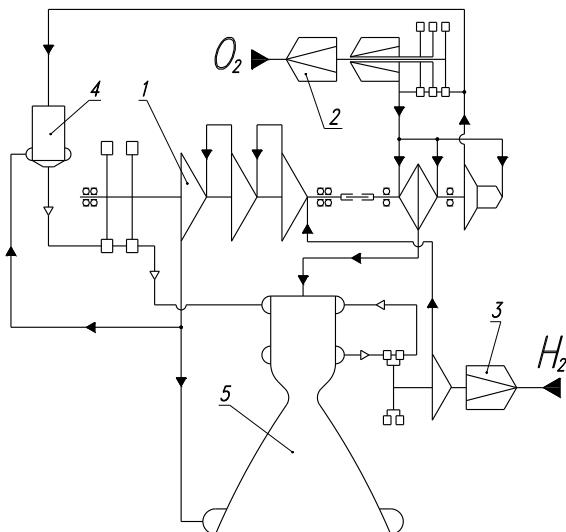


Рис. 2. Упрощенная схема двигателя РД0120
 1 – ТНА, 2 – БТНА окислителя, 3 – БТНА горючего,
 4 – газогенератор, 5 – камера двигателя

Бустерные турбонасосные агрегаты РД0120

В целях улучшения динамических характеристик роторов насосов ТНА и повышения их работоспособности в водородном насосе и в камерной ступени кислородного насоса не используются предвключенные шнеки, в результате чего величина потребных минимальных давлений на входе в насосы для обеспечения их бессрывной работы достигает 2,0–3,0 МПа. Реализация таких давлений в одноступенчатых БТНА при заданных давлениях компонентов топлива на входе в двигатель оказалась невозможной. В связи с этим в двигателе РД0120 впервые в мировой практике были использованы БТНА с двухступенчатыми насосами. Первая их ступень характеризуется высокими антикавитационными качествами ($C_{cpb}=5000$) и низким напором, требуемым для бессрывной работы второй ступени насоса БТНА, которая обеспечивает бессрывную работу соответствующего насоса ТНА [3].

Насос кислородного БТНА (рис. 3) выполнен по двухкаскадной схеме с двумя отдельными ступенями (каскадами). Первая и вторая ступени – оседиагональные. Вторая ступень насоса выполнена с собственным ротором, имеющим повышенную по отношению к первой частоту вращения. Первая ступень насоса приводится во вращение одноступенчатой гидротурбиной, установленной последовательно за двухступенчатой гидротурбиной второй ступени насоса. Питание гидротурбин осуществляется кислородом, отбираемым на выходе генераторной ступени кислородного насоса ТНА. После гидротурбин кислород, отводимый по трубопроводу, смешивается с основным потоком кислорода, выходящего из второй ступени БТНА.

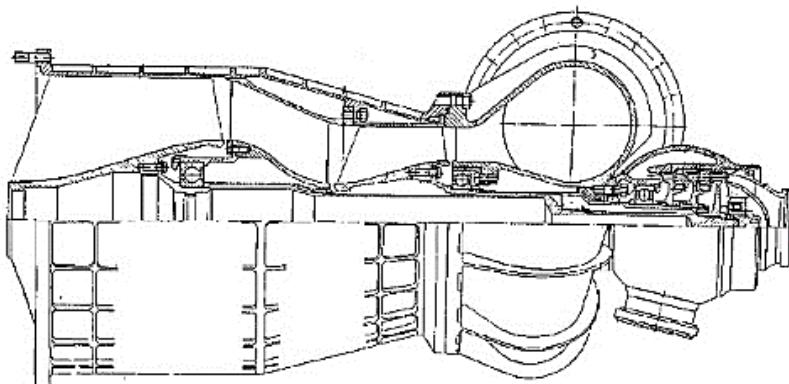


Рис. 3. БТНА кислорода ЖРД РД0120

В водородном БТНА (рис. 4) первая и вторая ступени насоса имеют общий ротор. Первая ступень – оседиагональная, вторая – центробежная. Диаметр оседиагонального колеса первой ступени насоса, выбранный исходя из условия достижения оптимальных антикавитационных качеств, больше диаметра входа в центробежное колесо, что потребовало установки лопаточного спрямляющего аппарата после колеса первой ступени. Приводом БТНА служит газовая турбина, питаемая газообразным водородом, поступающим из охлаждающего тракта камеры двигателя.

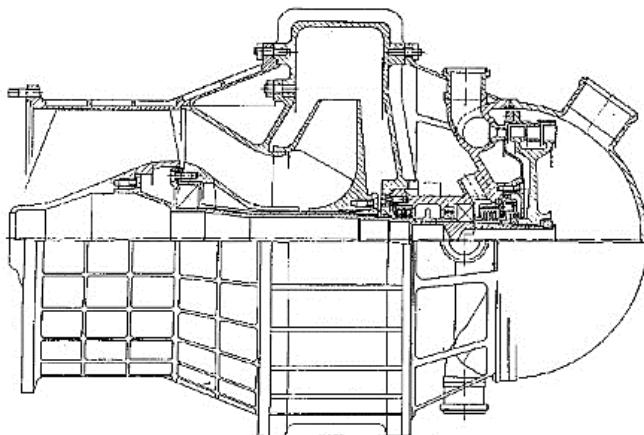


Рис. 4. БТНА водорода ЖРД РД0120

В двигателе RS-25, аналогичном по тяге и назначению, БТНА по своей конструкции существенно проще. Для сравнения конструктивные схемы БТНА двигателя RS-25 [4, 5] приведены на рис. 5.

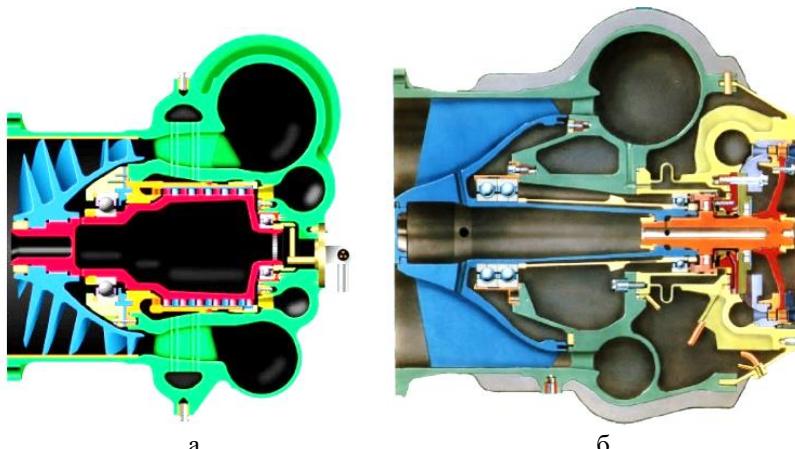


Рис. 5. БТНА двигателя RS-25: а – окислителя, б – горючего

Турбонасосный агрегат двигателя РД0120

Типовой для российских ЖРД является схема с радиальным подводом газа к турбине ТНА, размещенным между насосом и турбиной, и осевым отводом. При этом рабочие колеса турбины устанавливаются на валу консольно, а подшипник турбины размещается на валу между насосом и турбиной. Из-за высокой мощности и большого диаметра вала между насосом водорода и турбиной ТНА двигателя РД0120, обусловленного большим крутящим моментом, для реализации классической схемы требовались подшипники с быстроходностью, в два раза превышающей достигнутую в то время для ТНА ЖРД. Для использования подшипников с уровнем быстроходности, достигнутым к 80-м годам XX века, рабочие колеса водородного насоса и турбины ТНА РД0120 (рис. 6) [6] были размещены по краям ротора – между подшипником, установленным со стороны входа в насос, и подшипником, размещенным в полости входа в турбину. Считалось, что традиционные стальные шарикоподшипники с составным клепанным фторопластовым сепаратором обеспечат десять полетов без ремонта ТНА. Этот вывод базировался на успешных 8-ми кратных наземных испытаниях с длительностью около 4-х часов малоразмерного водородного ТНА двигателя РД0410.

Для реализации межпорной конструкции ротор пришлось выполнить составным. Составной ротор водородного насоса ТНА двигателя РД0120 включает вал, два рабочих колеса турбины, соединенных между собой и с валом с помощью неразъемного соединения с радиальными штифтами, через которые передается крутящий момент от турбины к насосам и втулку опоры турбины, соединенную штифтами с диском рабочего колеса первой ступени турбины. На штифтовые соединения колес турбины действуют усилия от крутящего момента, центробежные силы от штифтов, осевые и радиальные усилия, действующие на ротор. Номинальная частота вращения ротора находилась между второй и третьей критическими частотами вращения. Отечественный ТНА с гибким ротором такого типа создавался впервые. Подобные характеристики имел ротор водородного ТНА двигателя RS-25, разработанного

Rocketdyne, однако в роторе не использовались штифтовые соединения колес турбины. При высокочастотной балансировке роторы водородного ТНА РД0120 периодически показывали нестабильные величины нагрузок на опоры и прогибов ротора, превышающие допустимые значения. Нестабильность динамических характеристик ротора при изготовлении и разбалансировка ротора, выявляемая после испытаний двигателя, могла быть вызвана взаимным смещением колес турбины и вала в штифтовых соединениях из-за действующих на них нагрузок.

Со стальными подшипниками с составным сепаратором при испытаниях двигателя РД0120 на номинальном режиме реализовано девять пусков общей длительностью около 4000 с. Из-за износа центрирующей поверхности сепаратора испытания подшипников в имитаторе прекращались после десяти пусков общей длительностью около 10000 с [7, 8]. Таким образом, принятное в ТНА двигателя РД0120 расположение подшипников по краям ротора не только не решило задачу обеспечения требуемой долговечности подшипников, но и не обеспечило многократность использования ТНА из-за разбалансировки ротора после работы в составе двигателя.

Для обеспечения многократности использования двигателя РД0120 предусматривался его ремонт, в том числе ТНА. Из-за отсутствия на момент проектирования отработанной конструкции уплотнений фланцевых разъемов газовых магистралей разработка конструкции велась со сварными соединениями на входе и выходе турбины. Была разработана компоновка водородного насоса, обеспечивающая разборку ТНА для ремонта и последующую сборку в составе двигателя. При этом разборка выполнялась со стороны входа в насос без демонтажа магистралей входа и выхода турбины, магистрали выхода водородного насоса. В компоновке ТНА впервые в практике АО КБХА применен осевой вход в турбину. ТНА с осевым подводом газа к турбине присущи такие недостатки как сложность осевого уравновешивания ротора при запуске двигателя и пониженная экономичность водородного насоса, связанная с уравновешиванием большого величины осевого усилия от турбины и неблагоприятного его направления в сторону насоса. Помимо особенностей такой схемы подвода газа рассмотрены в [9].

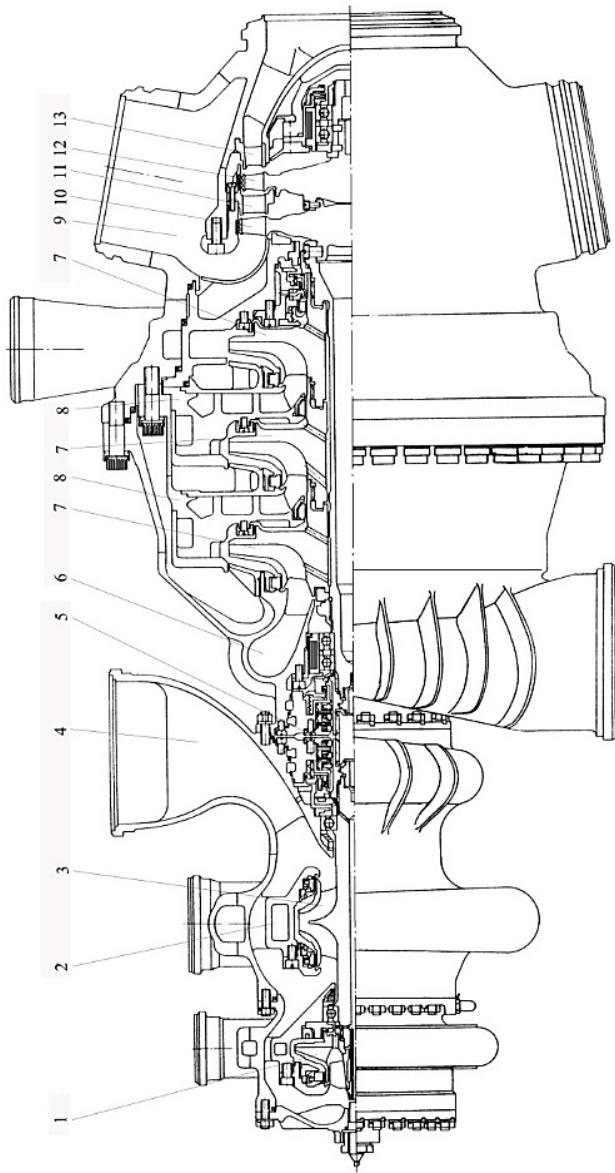


Рис. 6. Продольный разрез ТНА ЖРД РД0120:

1 – крольчатка генераторной ступени; 2 – отвод камерной ступени; 3 – крольчатка камерной ступени; 4 – подвод кислородного насоса; 5 – разделяльное уплотнение; 6 – подвод водородного насоса; 7 – крольчатка; 8 – обратный направляющий аппарат; 9 – коллектор отвода газа от турбины; 10 – рабочее колесо второй ступени турбины; 11 – сопловой аппарат второй ступени турбины; 12 – рабочее колесо турбины; 13 – сопловой аппарат первой ступени турбины

При длительных испытаниях двигателя РД0120 на повышенных режимах по тяге имели место разрушения лопаток рабочего колеса второй ступени турбины. Лопатки колес турбины двигателя РД0120 выполнялись из никелевого сплава ЭП741П заодно с диском методом порошковой металлургии. Формообразование лопаток производилось электроэрозионной обработкой. Разрушения были отмечены после наработки двигателя в течение 2583 с, в том числе 670 с на режиме 115 % тяги. Разрушения были вызваны высокими напряжениями от центробежных сил бандажа и термического коробления диска турбины – «зонтичного эффекта». Лопатки рабочего колеса первой ступени турбины, не испытывающие термических напряжений и менее нагруженные центробежными силами из-за меньшей высоты, не имели подобного дефекта. Повышение долговечности лопаток было обеспечено за счет повышения экономичности насоса горючего и турбины, что позволило снизить температуру на входе в турбину и частоту вращения ротора, снижения напряжений в лопатках и уменьшения концентрации напряжений в лопатках и бандаже.

Дальнейшее повышение долговечности лопаток проводилось по методике ЦИАМ в специальной экспериментальной установке на отдельных лопатках, вырезанных из рабочего колеса совместно с частью диска, которая использовалась для крепления захватов нагружающего устройства. Лопатки подвергались повторно-статическому термомеханическому нагружению, соответствующему условиям эксплуатации. Результаты испытаний показали, что наиболее эффективным мероприятием, повысившим долговечность лопаток в шесть раз, явилось утолщение выходных кромок лопаток за счет их подрезки и выполнение скосов входных и выходных кромок у бандажа, уменьшивших массу и свисание бандажа за пределы кромок лопаток [10].

В связи с тем, что работы по двигателю РД0120 были прекращены практически сразу после успешных летных испытаний в составе РН «Энергия», его конструкция не подвергалась модернизации, однако в АО КБХА прорабатывались варианты существенной модернизации ТНА для многократного применения, один из вариантов модернизации приведен на рис. 7 [6].

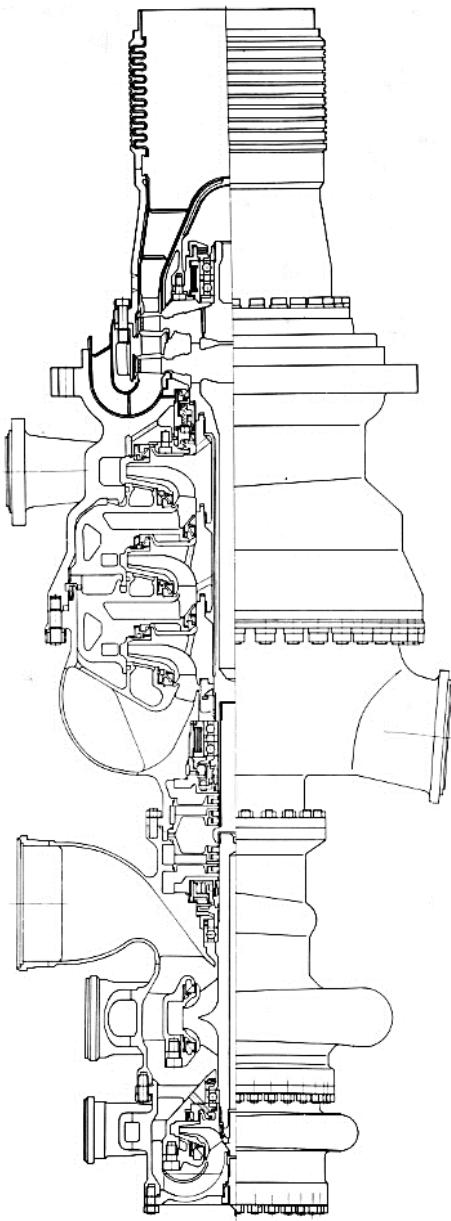


Рис. 7. Вариант ТНА для многоразового двигателя РД0120

Для сравнения рассмотрим двигатель аналогичной тяги и назначения – RS-25. В процессе эксплуатации двигатель RS-25 неоднократно подвергался модернизации [11, 12]:

- 1983-1995 (Phase I и Phase II) – модернизация практических всех агрегатов двигателя, включая достаточно серьезные усовершенствования ТНА и БТНА, направленная на повышение их надежности и работоспособности;
- 1995 (Block I, Block IA) – дальнейшая модернизация с заменой смесительной головки камеры сгорания и ТНАО, причем проектирование, изготовление и отработка ТНАО (рис. 8, 9) велись по отдельному контракту другим разработчиком – Pratt & Whitney вместо Rocketdyne. Целью замены ТНА было решение вопросов с динамическими характеристиками ротора и другими дефектами ТНАО разработки Rocketdyne, минимизация количества сварных швов при изготовлении (в новой конструкции ТНА было исключено 293 сварных шва), замена шарикоподшипников со стальными телами качения на более быстроходные шарикоподшипники с керамическими телами качения и цельным композитным сепаратором;

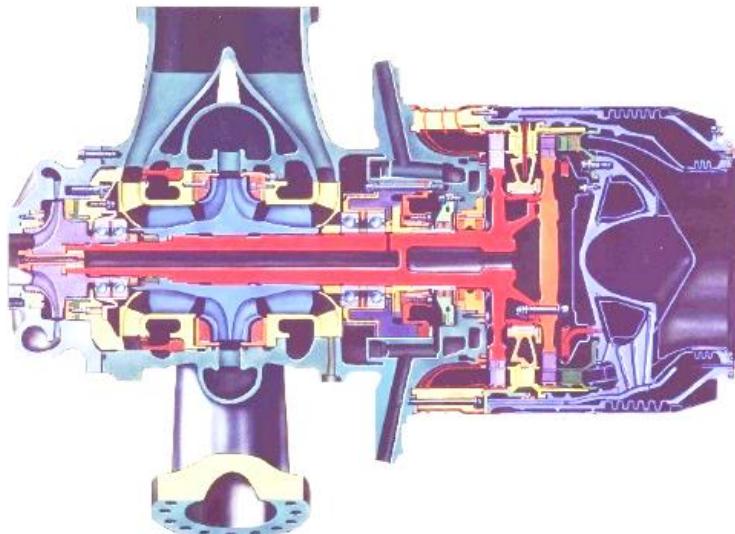


Рис. 8. ТНАО RS-25 разработки Rocketdyne

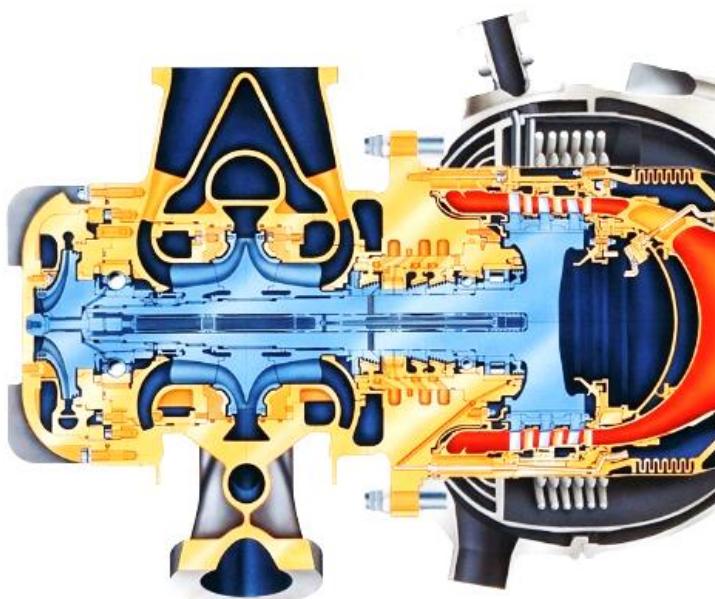


Рис. 9. THAO RS-25 разработки Pratt&Whitney

– 1998-2001 (Block II, Block IIА) – дальнейшее совершенствование конструкции, включая модернизация части агрегатов автоматики, применение БТНА окислителя и горючего усовершенствованной конструкции, замену ТНАГ разработки Rocketdyne на ТНАГ разработки Pratt & Whitney (рис. 10, 11), основными задачами при замене были повышение надежности и работоспособности агрегата, практически полностью были исключены сварные соединения в конструкции, выполнена замена шарикоподшипников со стальными телами качения на более быстroredные шарикоподшипники с керамическими телами качения и цельным композитным сепаратором.

Таким образом, в процессе эксплуатации наиболее существенной модернизации и переделке подверглись агрегаты подачи, так как именно они являются определяющими для ресурса и работоспособности двигателя.

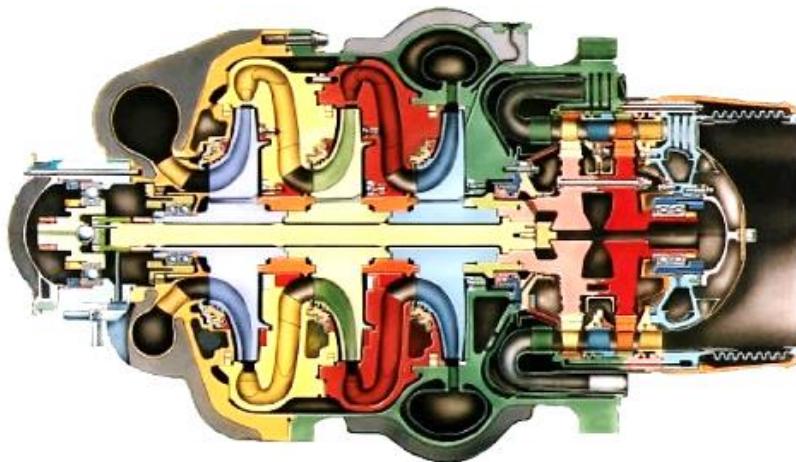


Рис. 10. ТНАГ RS-25 разработки Rocketdyne

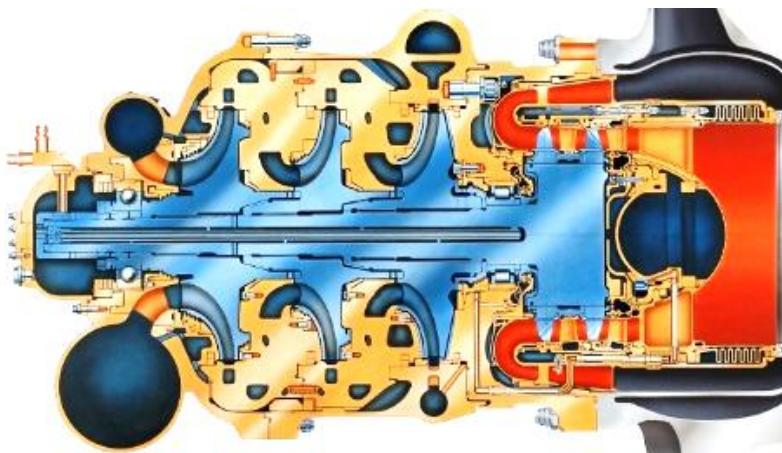


Рис. 11. ТНАГ RS-25 разработки Pratt&Whitney

В отличие от двигателя РД0120, после завершения программы Space Shuttle двигатель RS-25 не остался невостребованным [13], его модификация используется в составе первой ступени РН сверхтяжелого класса SLS. При этом его модернизация не остановилась, с учетом достигнутых технических характеристик и того, что для РН SLS требуется однократное включение

двигателя, она была направлена на снижение стоимости двигателя и его агрегатов. Удалось добиться снижения стоимости БТНА окислителя и горючего на 20%, ТНАО и ТНАГ – на 25%, силовой головки, включающей в себя часть корпусов турбин – на 30 %. Основной эффект в снижении стоимости был достигнут за счет применения аддитивных технологий [14], позволивших сократить трудоемкость и длительность производственного цикла.

При создании перспективных отечественных средств выведения тяжелого и сверхтяжелого класса с использованием модификаций двигателя РД0120 опыт RS-25 должен быть принят во внимание, в связи с чем актуальной задачей является модернизация агрегатов подачи, включая модернизацию ТНА, БТНАО и БТНАГ, проектирование, изготовление и отработка которых должны вестись на базе всех самых современных технических решений и технологий с использованием результатов отработки агрегатов подачи двигателей РД0120, RS-25, РД180, РД0124, РД0146, РД191 [15, 16] и др. Кроме того, необходимость постоянного совершенствования конструкции ТНА подтверждается обобщенным анализом отказов ЖРД при летных испытаниях [17], который показывает, что доля аварий, связанных с ТНА в ЖРД достигает 50 %.

Для сравнения параметры агрегатов подачи двигателей РД0120 и RS-25 приведены в таблице 1 [3, 5, 6].

Таблица 1

Параметры агрегатов системы питания

Наименование параметра	РД0120				RS-25			
	БТНАО	БТНАГ	НО ТНА	НГ ТНА	БТНАО	БТНАГ	ТНАО	ТНАГ
Давление на входе в насос, МПа	0,814	0,304	4,08	1,74	0,689	0,207	2,9/ 27,75	2,05
Расход через насос, кг/с	358,2	60,25	358	60,0	423,6	70,3	508/ 41,7	70,3
Давление на выходе из насоса, МПа	4,08	1,74	49,3/ 58,0	45,5	2,903	2,055	27,75/ 47,84	41,07
Давление на входе в турбину, МПа	–	–	–	–	26,2	29,075	33,2	33,05
Температура на входе в турбину, К	–	–	800	–	104,3	264,8	739,3	983,2
Расход через турбину, кг/с	72,3/ 75,6	–	–	–	84,4	13,15	30,84	67,6
Частота вращения ротора, об/мин	3200/ 12490	15024	33500	–	5018	15519	22250	34311
Мощность турбины, кВт	–	–	68000	–	1187	2450	16828	46396

Направления модернизации агрегатов подачи двигателя РД0120

С учетом вышеизложенного можно сформулировать основные направления и ограничения по модернизации агрегатов подачи усовершенствованного двигателя РД0120:

- упрощение конструкции агрегатов системы питания: БТНАО – исключение двухкаскадной схемы, переход на схему шнекотурбинного бустерного насосного агрегата [16], БТНАГ – исключение центробежной ступени насоса, ТНА – введение шнеков в насосы окислителя и горючего, замена генераторной ступени насоса кислорода с полновапорной на дожимную;
- сохранение схемы ТНА – однороторный ТНА с осевым подводом газа к турбине, так как такая конструкция является основой существующей схемы и компоновки двигателя;
- применение подшипников повышенной быстроходности с керамическими телами качения и цельным композитным сепаратором;
- расположение рабочих колес турбины ТНА консольно по отношению к опорам, ужесточение ротора для исключения изгибных колебаний при прохождении критических частот вращения;
- выполнение рабочего колеса турбины ТНА с расположением обоих рабочих лопаточных венцов на одном диске;
- ограничение использования в ТНА литых заготовок и сварных соединений, предлагается максимально использовать высокопроизводительную обработку на станках с ЧПУ и аддитивные технологии изготовления;
- изготавливаться составных частей водородных насосов ТНА и БТНА горючего из титановых сплавов, показавших более высокую, по сравнению со сталью и никелевыми сплавами, работоспособность в среде жидкого водорода.

Рассмотрим более подробно предложенные направления модернизации.

Упрощение конструкции агрегатов подачи требует проведения кавитационных расчетов. Расчет проведен, исходя из достигнутых в настоящее время величин кавитационного коэффициента

быстроходности (C_{kp}):

$$C_{kp} = 298 \cdot \omega_{max} \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{\left(\Delta p_{kp}/\rho\right)^{3/4}} \quad (1)$$

ω_{max} – максимальная частота вращения ротора, \dot{V} – объемный расход через насос, Δp_{kp} – критический кавитационный запас, ρ – плотность компонента на входе в насос.

В настоящее время для насосов, применяемых в ЖРД достигнутые значения C_{kp} составляют: для центробежных насосов – от 800 до 1200, для шнекоцентробежных насосов от 1500 до 2500, для осевых насосов – от 3000 до 5000.

Из уравнения (1), зная C_{kp} , получим значения Δp_{kp} :

$$\Delta p_{kp} = \rho \cdot \left(\frac{298 \cdot \omega_{max} \cdot \sqrt{\dot{V}}}{C_{kp}} \right)^{4/3} \quad (2)$$

Зная Δp_{kp} и давление насыщенных паров (p_s), получим критическое давление на входе в насос:

$$p_{kp} = \Delta p_{kp} + p_s$$

Приняв 40% запас по давлению на входе, зная Δp_{kp} , получим потребный кавитационный запас на входе в насос:

$$\Delta p_{bx}^H = 1,4 \cdot \Delta p_{kp}$$

Зная потребный кавитационный запас и давление насыщенных паров, получим минимальное давление на входе в насос:

$$p_{bx_{min}}^H = \Delta p_{bx}^H + p_s$$

Зададимся 20% запасом по давлению на входе в насос и получим номинальное давление на входе в насос:

$$p_{bx_{nom}}^H = 1,2 \cdot p_{bx_{min}}^H \quad (3)$$

С учетом имеющихся данных в зависимости от C_{kp} проанализированы потребные давления на входах в насосы. Результаты анализа приведены на рис. 12–13.

Из рисунков видно, что при использовании шнеков в насосах водорода и кислорода можно существенно снизить потребный

напор БТНА, упростив их конструкцию, по линии окислителя использовать шнекотурбинный БТНА с параметрами, близкими к БТНА кислорода семейства двигателей РД170 [16] – с частотой вращения порядка 7000–7500 об/мин и давлением на выходе порядка 2,5 МПа, а по линии горючего БТНА по конструкции близкий к БТНА водорода RS-25 с частотой вращений порядка 15000 об/мин и давлением на выходе порядка 2,0 МПа.

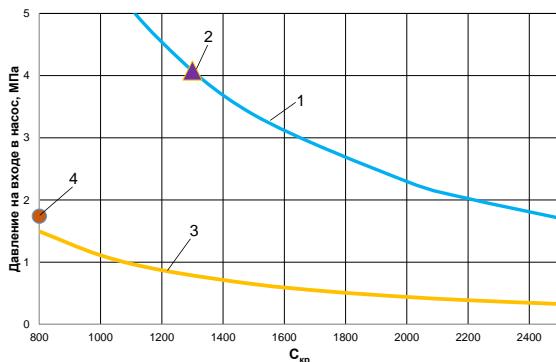


Рис. 12. Зависимость давления на входе в насосы ТНА от C_{kp}
1 – насос окислителя с параметрами, соответствующими ТНА РД0120,
2 – насос окислителя ТНА РД0120, 3 – насос горючего с параметрами,
соответствующими ТНА РД0120, 4 – насос горючего ТНА РД0120

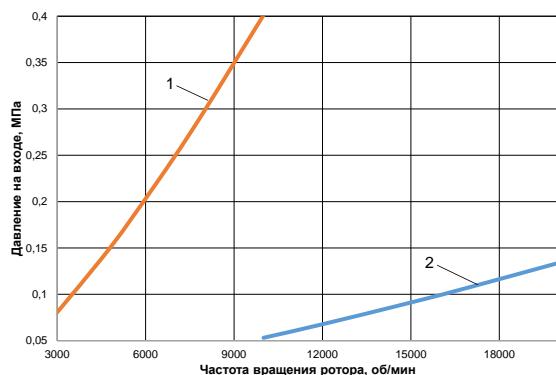


Рис. 13. Зависимость давления на входе в насосы БТНА от частоты вращения
1 – насос окислителя с $C_{kp}=3750$, 2 – насос горючего с $C_{kp}=3500$

Как уже отмечалось выше, осевой подвод газа к турбине ТНА необходимо сохранить, так как внедрение радиального подвода приведет к существенному изменению конструкции ТНА, компоновки двигателя и повышенному объему отработки. При сохранении схемы подвода газа ротор должен иметь схему с опорой, расположенной между рабочими колесами турбины и водородного насоса, что потребует увеличения типоразмера и быстротехнологичности подшипников. Для повышения экономичности ТНА может быть рассмотрено снижение степени реактивности турбины. При разработке компоновки водородного насоса целесообразно проработать вопросы улучшения осевой разгрузки и минимизации влияния «зонтичного эффекта» на работоспособность рабочего колеса турбины второй ступени.

С учетом вышеизложенного предлагается вариант схемы по-
дачи усовершенствованного двигателя РД0120, упрощенная
схема которой приведена на рис. 14.

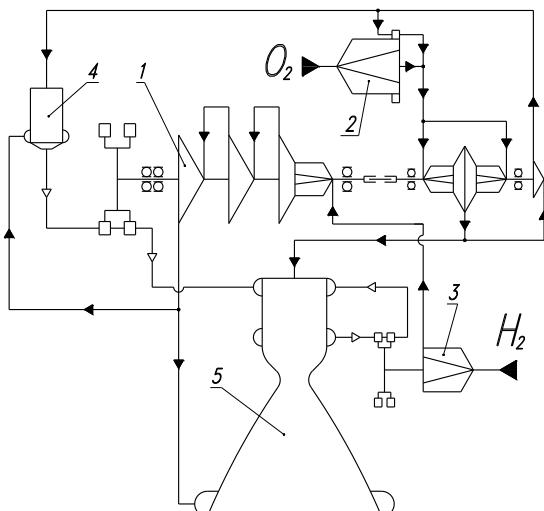


Рис. 14. Упрощенная схема усовершенствованного варианта двигателя РД0120

1 – ТНА, 2 – БТНА окислителя, 3 – БТНА горючего, 4 – газогенератор, 5 – камера двигателя

Для реализации предложенной схемы расположения опор

ротора ТНА усовершенствованного варианта двигателя РД0120 требуется внедрение гибридных подшипников с керамическими телами качения, кольцами из специальной стали и с монолитным сепаратором из прочного композиционного материала, обладающих более высокой быстроходностью и повышенной долговечностью по сравнению со стальными подшипниками с клепанным составным сепаратором. В Европе (Франция, Италия, Германия), США, Японии и Китае используются гибридные подшипники. В ТНА водорода, созданном Pratt&Whitney для RS-25, освоение и отработка гибридных подшипников задержало его создание на два года. Эти подшипники были разработаны фирмой CEROBEAR (Германия) [18] и применялись в ТНА, начиная с 2000 года. Было выполнено почти 40 миссий, решение CEROBEAR увеличило время между капитальными ремонтами двигателей в 12 раз, позволив увеличить полезную нагрузку на 9 %, а также сократило время обслуживания между миссиями с 1000 часов до менее 50 часов.

Внедрение керамических подшипников актуально не только для кислородно-водородных двигателей, а и для любых вновь создаваемых двигателей с целью обеспечения их конкурентоспособности на мировом рынке. Многократное использование ЖРД требует использования подшипников высокой долговечности, и эта задача решается использованием гибридных подшипников. В 2020 году вопрос применения гибридных подшипников был достаточно подробно рассмотрен в статьях [7, 8]. Цель этих статей – активизировать внедрение гибридных подшипников в ТНА современных российских ЖРД

Кроме расположения опор, следует ставить задачу за счет увеличения диаметра вала и втулок крыльчаток водородного насоса исключить вторую критическую частоту вращения из рабочего диапазона частот вращения ротора, что должно дополнитель но повысить долговечность опор ротора. В модернизированном ТНА РД0120 следует предусмотреть охлаждение уплотнений турбины, например, с учетом [19], уменьшить коробление соплового аппарата второй ступени за счет разделения его на несколько секторов, внедрить

в насосы трубчатые отводы [15], обеспечивающие снижение пульсаций и повышение экономичности, использовать все достижения отечественного и мирового двигателестроения. Следует проработать возможность исключения стояночных уплотнений между насосами, что с одной стороны потребует продувки разделительного уплотнения при подготовке к пуску, работе двигателя, межпусковом поддержании работоспособного состояния и повторных запусках в полете, а с другой – повысит надежность и работоспособность уплотнения. Между водородным насосом и турбиной может быть рассмотрено стояночное торцовое уплотнение более простой, по сравнению с используемой конструкцией, например, мембранныго типа или открываемое и закрываемое осевым перемещением ротора в процессе запуска и выключения двигателя. В трущиеся части уплотнения может быть использовано кольцо из пироуглерода [20], обладающего более высокой износостойкостью и прочностью в сравнении с пирографитом и меднографитами.

Выше уже отмечалось, что одной из задач создания двигателя РД0120 было обеспечение его ремонтопригодности. Следует отметить, что вопросы ремонтопригодности в первую очередь касаются двигателя – разработки компоновки, в которой каждый трубопровод и каждый агрегат демонтируется и ставится без снятия смежных элементов. Если ранее создание такой компоновки требовало большого числа натурных работ с применением полноразмерных макетов, что делало её труднореализуемой, то современные методы проектирования позволяют решить эту задачу на стадии разработки трехмерной компоновки [21]. Задача разработки такой компоновки должна ставиться и по модернизированному двигателю РД0120.

Еще одним важным вопросом создания усовершенствованного ТНА является выбор материалов и технологий. В настоящее время целесообразно широкое использование аддитивных технологий с минимизацией использования литых, штампованных и кованых заготовок, максимальным исключением сварных и паяных соединений. Например, вместо изготовления рабочих колес турбин с дисками и лопатками, выполненными за одно целое ме-

тодом горячего изостатического прессования из гранулированного никелевого сплава ЭП741П с формообразованием лопаток электроэррозионной обработкой, предлагается изготавливать диски совместно с лопатками с применением аддитивных технологий из сплава ВВ751П (таблица 2), имеющего более высокий уровень механических свойств. Однако такую технологию необходимо подтвердить автономными испытаниями лопаток, подобным испытаниям лопаток турбины двигателя РД0120 [10], экспериментально проверить характеристики материалов в жидком и газообразном водороде [22], что осложняется отсутствием в Российской Федерации базы для выполнения таких исследований.

Таблица 2
Сравнение механических свойств дисковых сплавов

Материал	Способ получения заготовки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KСU, Дж/см ²
ЭП741П (ХН53КВМТЮБ) [23]	ГИП	1225	785	13	—	50
ЭП741П (239 К) вакуум/водород [24]	ГИП	1310/ 840	930/ 780	21/8	22/10	—
ЭП741П (1073 К) вакуум/водород [24]	ГИП	1020/ 950	840/ 820	12/10	22/12	—
ЭП741НП (ХН51КВМТЮБ) [25]	ГИП	1420	1025	20	15	45
ВВ751П (ХН56КВМТЮБ) [25]	ГИП	1600	1200	12	13	25
ВВ751П (ХН56КВМТЮБ) [26]	СЛС + ВГО, XY/Z	1280/ 1430	900/ 1000	20/ 12,5	36/26	—
ВВ751П (ХН56КВМТЮБ) [27]	ПЛВ	1115,6	981,9	8,7	—	—

ГИП – горячее изостатическое прессование; СЛС – селективное лазерное сплавление; ВГО – высокотемпературная газостатическая обработка; ПЛВ – прямое лазерное выращивание; σ_b – предел прочности; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; δ – относительное удлинение; ψ – относительное сужение; КСU – ударная вязкость.

Для корпусных элементов насоса окислителя и турбины может быть использован свариваемый никелевый сплав типа АЖК [28], работоспособный до 1073–1123 К, имеющий механические

свойства на уровне дисковых никелевых сплавов, пригодный для изготовления элементов конструкции с применением аддитивных технологий.

Элементы конструкции водородных насосов ТНА и БТНА предлагаются максимально изготавливать из титановых сплавов, которые показали высокую работоспособность в среде жидкого водорода. В качестве базового материала для изготовления с применением аддитивных технологий может быть использован сплав BT6C, при необходимости могут быть отработаны металлопорошковые композиции на основе более высокопрочных титановых сплавов BT18 и BT20.

Использование в водородном насосе титановых сплавов, исключение опоры ротора со стороны входа в турбину, упрощение конструкции корпусов водородного насоса позволят снизить массу ТНА.

Один из возможных вариантов модернизации ТНА двигателя РД0120 представлен на рис. 14.

Так как ТНА – один из наиболее сложных и трудоемких агрегатов, на базе имеющихся двигателей РД0120 [29] можно создать двигатель-демонстратор с модернизированным ТНА, провести его испытания. Результаты этой работы могут быть полезными не только для восстановления производства двигателя РД0120, но и при разработке вновь создаваемых маршевых кислородно-водородных и кислородно-метановых многоразовых ЖРД.

Возродить кислородно-водородный двигатель РД0120 в Российской Федерации сложно, с прекращением существования Советского Союза в России уменьшились материальные и человеческие ресурсы, произошел разрыв кооперационных связей, ряд производств и технологий потеряны. Сегодня важно не потерять водородные технологии в ракетостроении, создание усовершенствованного ТНА для двигателя РД0120 могло бы стать одним из ключевых моментов не только в восстановлении, но и в развитии этих технологий для обеспечения лидерства Российской Федерации в области ракетного двигателестроения и средств выведения.

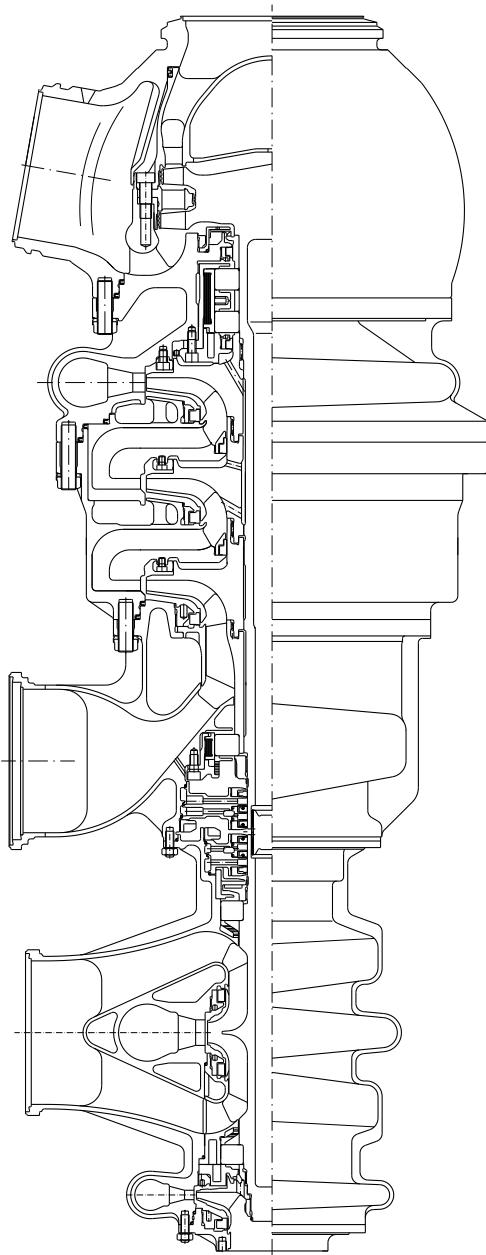


Рис. 14. Вариант модифицированного ТНА двигателя РД0120

Выводы

1. В настоящее время вопрос сохранения и развития водородных технологий является одним из важнейших в развитии отечественного ракетного двигателестроения с точки зрения создания конкурентоспособных средств выводения, и критическим с точки зрения паритета в создании РН сверхтяжелого класса.
2. В качестве базового варианта для модернизации, отработки современных технических решений, в первую очередь в области агрегатов подачи, может быть использован двигатель РД0120.
3. В случае решения о восстановлении производства кислородно-водородного ЖРД РД0120 требуется модернизация агрегатов подачи, являющихся определяющими элементами в обеспечении ресурса и надежности ЖРД, с учетом опыта как отечественного, так и международного, накопленного с 70-х годов XX века.
4. Модернизация агрегатов подачи двигателя РД0120 должна быть направлена на упрощение конструкции БТНА и ТНА, повышение запасов работоспособности, внедрение современных технологий проектирования и производства, достижений материаловедения, использование отработанных и перспективных технических решений, включая гибридные подшипники и аддитивные технологии.

Литература

1. <https://www.interfax.ru/russia/456608>. Обращение 03.05.2022
2. Губанов Б.И. Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Том 3: «Энергия» – «Буран». Нижний Новгород: издательство НИЭР, 1998, 492 с.
3. Способы обеспечения антикавитационной устойчивости систем питания жидкостных ракетных двигателей, разработанных КБ химавтоматики / Ю.В. Демьяненко, А.И. Дмитренко, И.И. Калитин, В.К. Першин // Космонавтика и ракетостроение, 1999. – №16, – С. 73–81.
4. Design, Development, and History of The Oxygen/Hydrogen Engine RD-0120 / V.S. Rachuk, N.S. Goncharov, Y.A. Martynenko, B.M. Barinshtein, F.A. Sciorelli//AIAA 95-2540, 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE

Joint Propulsion Conference and Exhibit. July 10-12, SanDiego, CA, 16 pp.

5. http://lpre.de/p_and_w/SSME/SSME_PRESENTATION.pdf. Обращение 19.05.2022.

6. Дмитренко А.И., Иванов А.В., Рачук В.С. Турбонасосные агрегаты для водородных ЖРД, разработанных КБХА // Научно-технический юбилейный сборник. КБ химавтоматики: В 3 томах. – Воронеж: «Квартя», 2012: Т. 2. – С. 159–169.

7. Дмитренко А.И., Иванов А.В. Некоторые вопросы обеспечения многоразовости использования ТНА жидкостных ракетных двигателей. Часть I. Предпосылки к созданию подшипников ТНА многоразовых ЖРД // Труды НПО Энергомаш. М., 2020. № 37. С. 91–116.

8. Дмитренко А.И., Иванов А.В. Некоторые вопросы обеспечения многоразовости использования ТНА жидкостных ракетных двигателей. Часть II. Результаты отработки подшипников ТНА. Основные направления совершенствования подшипников ТНА многоразовых ЖРД // Труды НПО Энергомаш. М., 2020. № 37. С. 117–143.

9. Дмитренко А.И., Иванов А.В. Особенности разгрузки роторов турбонасосных агрегатов ЖРД с осевым подводом рабочего тела к турбине // Труды НПО Энергомаш. М., 2019. № 36. С. 163–178.

10. Опыт применения газостатического прессования заготовок в турбонасосных агрегатах ЖРД / А.И. Дмитренко, В.С. Рачук, М.А. Рудис, В.И. Холодный // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. Выпуск 2. Гранулируемые сплавы в двигателях. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2001. С. 98–134.

11. Fred H. Jue. Space Shuttle Main Engine Thirty Years Of Innovation. <https://ininet.org/space-shuttle-main-engine-thirty-years-of-innovation.html>. Обращение 04.05.2022.

12. Katherine P. Van Hooser, Douglas P. Bradley. Space Shuttle Main Engine – The Relentless Pursuit of Improvement. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120001539/downloads/20120001539.pdf>. Обращение 08.05.2022.

13. Richard O. Bollard. Next-Generation RS-25 Engines for the NASA Space Launch System / 7th European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS). DOI: 10.13009/EUCASS2017-140.

14. Paul Gradl, Omar Mireles, Nathan Andrews. Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion and Energy Systems / AIAA Propulsion Energy and Forum 2021.

15. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш / В.К. Чванов, А.М. Каикаров, Е.Н. Ромасенко, Л.А. Толстиков // Труды НПО Энергомаш. М., 2004. № 22. С. 81–99.

16. Ромасенко Е.Н., Толстиков Л.А. Бустерные турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш // Труды НПО Энергомаш. М., 2004. № 22. С. 100–118.
17. К проектированию насосной системы подачи топлива в ЖРД многоцелевого использования / И.В. Баньковская, И.И. Белоусов, В.И. Петров, Е.Н. Ромасенко // Труды НПО Энергомаш. М., 2005. № 23. С. 204–217.
18. <https://www.cerobear.com/applications/aerospace/>. Обращение 06.05.2022.
19. Турбонасосный агрегат. Патент РФ на изобретение № 2684063, заявка № 2018115594 от 25.04.2018, Опубл. 03.04.2019, Бюл. № 10. Иванов А.В., Дмитренко А.И., Скоморохов Г.И., Шматов Д.П.
20. <http://pyrocarbon.ru/images/buklet.pdf>. Обращение 29.05.2022.
21. Иванов А.В., Тверье О.Б. Применение цифровых технологий при проектировании ЖРД // Труды НПО Энергомаш. М., 2020. № 37. С. 69–90.
22. Ткачев В.И., Холодный В.И., Левина И.Н. Работоспособность ста-лей и сплавов в среде водорода. Львов: изд-во Вертикаль, – 1999. 256 с.
23. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ. Электронный журнал. 2016, № 10. dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2
24. Прочность и ресурс ЖРД / Н.А. Махутов, В.С. Рачук, М.М. Гаденин и др.: под ред. Н.А. Махутова и В.С. Рачука; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 201. – 525 с.
25. Освоение перспективного высокопрочного гранулируемого никелевого сплава для турбинных дисков авиационных двигателей нового поколения / Г.С. Гариков, Н.М. Гриц, А.В. Востриков, Е.А. Федоренко, А.М. Волков // Технология легких сплавов. 2012, №3. – С. 64–69.
26. <https://rt-ecat.ru/zharoprochnye-nikelевые-splavy>. Обращение 19.05.2022.
27. <https://www.smtu.ru/file/pages/515/PNI1.2-1-SMTU.pdf>. Обращение 29.05.2022.
28. Жаропрочный свариваемый никелевый сплав для перспективных жидкостных ракетных двигателей / А.С. Кляцкин, В.Н. Денисов, В.Н. Бутрим, А.Г. Берсенев, А.И. Логачёва, М.И. Силис // VIII Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Сузdal. 6–10 октября 2014 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2014, С. 119–121.
29. <https://argumenti.ru/economics/2018/10/587809>. Обращение 30.05.2022

Поступила 06.06.2022 г.