

## РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ВОДОРОДНЫХ ЖРД БЕЗГЕНЕРАТОРНОЙ СХЕМЫ, РАЗРАБОТАННЫХ В КБХА

© 2010 А. И. Дмитренко, А. В. Иванов, В. С. Рачук

Конструкторское бюро химавтоматики (КБХА), г. Воронеж

Статья посвящена развитию конструкции турбонасосных агрегатов для двигателей безгенераторной схемы, разработанных в КБХА.

*Ракетный двигатель, ЖРД, турбонасосный агрегат, ТНА, насос, турбина, ротор, кислород, водород.*

Современные системы питания водорода, включающие главный и бустерный турбонасосные агрегаты, являются важной составной частью космических жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Уровень совершенства и надёжность турбонасосных агрегатов оказывают заметное влияние на технические характеристики двигателей.

От экономичности главного турбонасосного агрегата (ТНА) в значительной мере зависит уровень такого важного параметра двигателя, как давление в его камере. Антикавитационными качествами насоса бустерного турбонасосного агрегата (БТНА) определяется уровень давления водорода в баке и возможность реализации подачи водорода на вход двигателя без наддува бака. Долговечность подшипников и рабочих лопаток турбины ТНА могут определять периодичность и стоимость межполётного ремонта двигателей.

В настоящей статье рассмотрены водородные ТНА ЖРД безгенераторной схемы, созданные в КБХА. Кроме того, рассмотрен водородный ТНА ядерного ракетного двигателя (ЯРД) РД-0410, так как по своим параметрам и условиям работы ТНА ЯРД очень близки к ТНА ЖРД безгенераторной схемы.

С точки зрения ТНА безгенераторной схемы ЖРД присущи следующие особенности:

– низкая температура рабочего тела турбины;

– равномерное температурное поле газа на входе в турбину;

– низкие термические удары в конструкции турбины;

– низкие термические напряжения в зоне между насосом и турбиной;

– низкие термические напряжения в рабочих колесах турбины, связанные с утечками водорода из насоса в турбину;

– исключение возможности перегрева подшипников, расположенных рядом с турбиной после выключения двигателя;

– улучшение условий работы уплотнений, разделяющих насос и турбину ТНА окислителя;

– отсутствие «забросов» температуры рабочего тела турбины при запуске и останове двигателя;

– отсутствие газогенератора с агрегатами его запуска и управления;

– пониженный уровень вибрационных нагрузок благодаря отсутствию в схеме двигателя одного из основных источников вибраций – газогенератора;

– отсутствие влаги в полостях турбины из-за того, что в составе рабочего тела турбины отсутствуют пары воды.

Кроме того, сокращаются сроки и стоимость отработки двигателя за счет возможности предварительной автономной отработки систем питания окислителя и горючего на натуральных компонентах с приводом турбины ТНА газообразным водородом от систем стенда.

В 1963 году в США был введён в эксплуатацию созданный в Пратт-Уитни кислородно-водородный ЖРД RL10, выполненный по безгенераторной схеме. Этот двигатель успешно эксплуатируется и в настоящее время в составе верхних ступеней ракет «Дельта», «Титан», «Атлас».

С момента создания первого кислородно-водородного двигателя RL10, насчитывающего более чем сорокалетнюю историю, к настоящему времени разработаны три принципиально отличающиеся друг от друга схемы систем питания.

Отличительной особенностью схемы системы питания двигателя RL10 является наличие зубчатого редуктора, связывающего вращающиеся с различными частотами роторы водородного и кислородного насосов ТНА. В системе питания отсутствуют БТНА. Насосы, турбина и редуктор выполнены в виде единого блока. Подобная схема реализована также в двигателях НМ-7 (Франция) и YF-73 (Китай). Работоспособность при относительно низких давлениях на входе в двигатель обеспечивается выбором достаточно низких частот вращения роторов водородного и кислородного насосов, оптимальных по экономичности для каждого насоса. Это главное достоинство такой системы питания. Другим важным её достоинством является согласованное за счёт механической связи роторов изменение на переходных режимах работы двигателя параметров водородного и кислородного насосов. К достоинству схемы также следует отнести наличие одной рабочей турбины. Недостаток схемы питания – высокоскоростной зубчатый редуктор, имеющий ограничения по скорости, нагрузкам и долговечности.

В кислородно-водородном ЖРД РД-0120 с дожиганием, созданном в КБХА для ракетно-космической системы «Энергия-Буран», система подачи [1] имеет ТНА, водородный и кислородный бустерный турбонасосные агрегаты (рис. 1). ТНА имеет традиционную для отечественных ЖРД одноблочную схему, в кото-

рой насосы горючего и окислителя имеют одинаковые частоты вращения за счёт механической связи роторов с помощью шлицевой рессоры. Схема системы питания с одноблочной схемой ТНА используется в кислородно-водородных российских двигателях Д57 и КВД-1. В данной схеме обеспечивается согласованное изменение параметров водородного и кислородного насосов ТНА на переходных режимах за счёт механической связи роторов, используется одна рабочая турбина ТНА. Отсутствие зубчатого редуктора – главное достоинство схемы питания с одноблочным ТНА по сравнению со схемой с ТНА, имеющим зубчатый редуктор. Недостаток схемы заключается в ограниченных возможностях оптимизации параметров кислородного и водородного насосов.

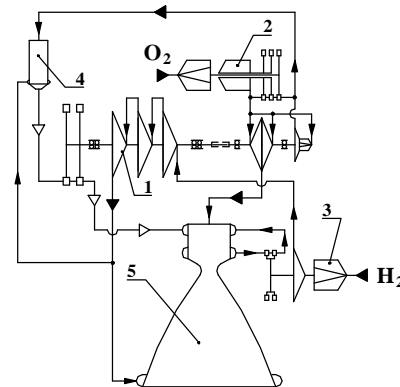


Рис. 1. Схема системы питания ЖРД РД-0120  
1 – ТНА, 2 – БТНА кислорода, 3 – БТНА водорода,  
4 – газогенератор, 5 – камера сгорания

В системе подачи созданного в США кислородно-водородного ЖРД SSME для ракетной системы «Спейс Шаттл» используется два главных и два бустерных турбонасосных агрегата. В двигателе SSME согласованное изменение на переходных режимах параметров водородного и кислородного насосов главных ТНА обеспечивается бортовым компьютером. Достоинством такой схемы системы питания по сравнению со схемой с одноблочным ТНА является более широкая возможность оптимизации параметров кислородного и водородного насосов. Недостатком схемы является использование двух высоконагруженных турбин – в главном кислородном и главном водородном ТНА.

Схема системы питания с двумя главными ТНА используется в созданном в КБХА двигателе РД-0146 (рис. 2). Для обеспечения бескавитационной работы насосов ТНА в этом двигателе используются два бустерных турбонасосных агрегата. В двигателе не используется бортовой компьютер. Аналогичные схемы системы питания, но без БТНА применены в двигателях Vulcain и Vinci (Франция), LE-5 и LE-7 (Япония), YF-75 (Китай).

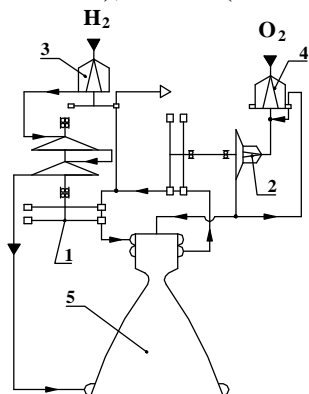


Рис. 2. Схема системы питания ЖРД РД-0146  
1 – ТНА водорода, 2 – ТНА кислорода, 3 – БТНА водорода, 4 – БТНА кислорода, 5 – камера

В настоящее время в КБХА создано три водородных ТНА для двигателей без-генераторной схемы: ТНА для ЯРД РД-0410 [2], водородный ТНА для ЖРД РД-0146 [3] и главный турбонасосный агрегат (ГТНА) для модернизации двигателя RL-10 [4]. Кроме того, с 1998 по 2002 год бы-

ло разработано три кислородных ТНА для двигателей Cause, RL-60 и РД-0146 с турбиной, приводимой во вращение газообразным водородом.

Первым водородным ТНА, разработанным в КБХА, был ТНА для ЯРД РД-0410. Его разработка началась в 1965 году. Система подачи водорода [2] этого двигателя (рис. 3) включала главный ТНА [1] с трёхступенчатым насосом, приводимым одноступенчатой осевой турбиной (рис. 4), и бустерный ТНА, в котором для привода насоса использовалась гидротурбина. Двигатель должен был обеспечивать 10 запусков с общим временем работы 3600 с. Отработка системы подачи ЯРД РД-0410 осуществлялась в составе «холодного» двигателя, была достигнута наработка ТНА и БТНА 13380 с без их переборки и ремонта с сохранением работоспособного состояния. Основные параметры ТНА приведены в табл. 1.

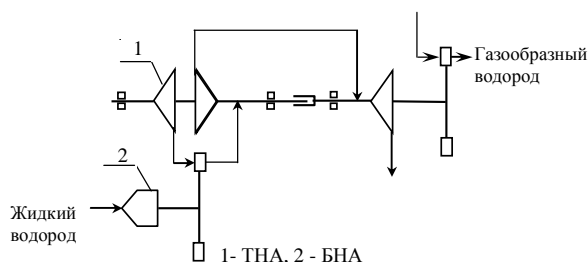


Рис. 3. Схема системы питания ЯРД РД-0410

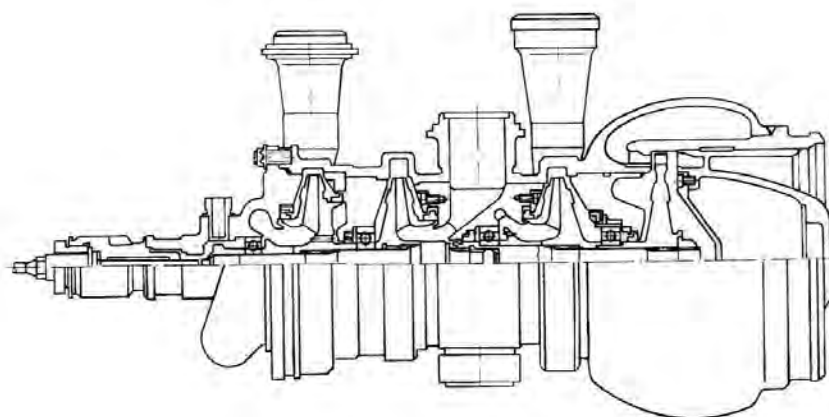


Рис. 4. Конструктивная схема ТНА ЯРД РД-0410

Вторым водородным ТНА, разработанным в КБХА, был ТНА для двигателя РД-0146. Его разработка началась в 1997 году, к настоящему времени ТНА в составе двигателя прошел 30 испытаний с на-

работкой 1675 с. ТНА представляет собой единый блок, объединяющий двухступенчатые насосы и турбину. Этот ТНА обладает рекордной из всех ТНА, использовавшихся в составе маршевых двигателей,

частотой вращения ротора. Ротор ТНА – закритический, его рабочая частота вращения расположена между второй и третьей критическими частотами вращения. Внешний вид ротора ТНА приведен на рис. 5. Основные параметры ТНА приведены в табл. 1. В конструкции ТНА широко используются детали, изготовленные методом горячего изостатического пресования гранул, – рабочие колеса насоса и турбины, обратный направляющий аппарат насоса.

В 2004 году по контракту с Пратт-Уитни Рокетдайн (США) КБХА был разработан, изготовлен, а в марте 2007 года испытан на кислороде и водороде одноблочный главный турбонасосный агрегат (ГТНА) для модернизации двигателя RL-10. Применение этого ТНА позволяет расширить диапазон использования двигателя по тяге – от 50 до 156 кН вместо 67–110 кН. ТНА достаточно прост по своей конструкции, имеет высокую надёжность.



Рис. 5. Ротор ТНА водорода ЖРД РД-0146

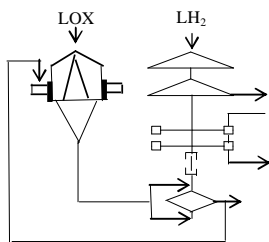


Рис. 6. Схема системы питания RL-10 с ГТНА

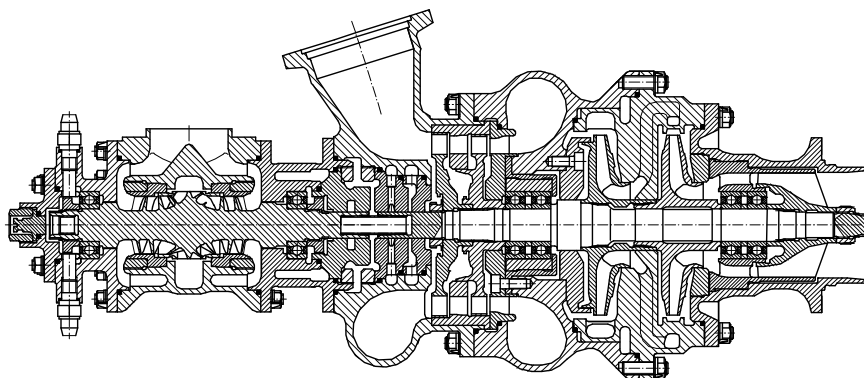


Рис. 7. Конструктивная схема одноблочного ГТНА для ЖРД RL10

Схема системы питания двигателя RL-10 при использовании ГТНА, разработанного КБХА, приведена на рис. 6, из которого видно, что внедрение ГТНА в конструкцию двигателя исключает зубчатый редуктор, но требует использования бустерного насоса по линии жидкого кислорода.

ГТНА состоит из имеющих одинаковую частоту вращения насосов окислителя и горючего (рис. 7). Насос горючего скомпонован в едином блоке с турбиной. Насос горючего состоит из вынесенной осевой ступени со спрямляющим аппаратом и двух центробежных ступеней. С выхода из первой центробежной ступени на вход водород подается с помощью обратного направляющего аппарата. Для разгрузки ротора от действия осевых сил в насосе предусмотрен автомат осевой разгрузки. Турбина ГТНА – осевая двухступенчатая. Для обеспечения приемлемой быстроходности насоса при высокой частоте вращения кислородный насос выполнен с двухсторонним входом. Роторы насосов для передачи крутящего момента от турбины к насосу окислителя соединены при помощи шлицевой рессоры. Между полостями турбины и насоса окислителя выполнено разделительное уплотнение. Ряд деталей водородного насоса изготавливается методом горячего изостатического пресования из порошка. На рис. 8 приведен внешний вид ротора водородного насоса ГТНА.

При проектировании всех этих ТНА использовался основополагающий принцип: «Простота конструкции – основа надежности и низкой стоимости ТНА». Для этого были реализованы следующие конструктивные мероприятия:

- минимум деталей;
- минимум сварных соединений;
- минимум наружных разъемов;
- широкое использование литых заготовок;
- рациональное использование порошковых заготовок;
- адаптация конструкции к условиям производства.



Рис. 8. Ротор водородного насоса ГТНА

Одной из ключевых задач создания ТНА является выбор частоты вращения. От выбранной частоты вращения зависит совершенство как самого ТНА, так и всего двигателя. Невозможно создать совершенный ТНА, если ставится задача существенного ограничения частоты вращения. Чем выше частота вращения, тем меньше масса и габариты агрегата. Увеличение частоты вращения в определенных пределах приводит к повышению экономичности водородного насоса и турбины, которые являются основными элементами системы питания, определяющими её экономичность, массу и габариты.

Одним из критериев выбора частоты вращения является коэффициент быстроходности

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \sqrt{\dot{V}} / H^{3/4},$$

где

$n$  – частота вращения ротора, об/мин;

$\dot{V}$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напор насоса, м.

Для центробежных насосов коэффициент быстроходности  $n_s$  находится в довольно узких пределах со значением от 40

до 130, а для водородных насосов диапазон оптимальных значений ещё уже – от 40 до 70.

Так как мощность водородного насоса примерно в три раза превышает мощность кислородного насоса, то разработка системы питания подчинена задаче обеспечения максимального КПД водородного насоса. Если ТНА выполняется одноблочным, возникают трудности в решении этой задачи. Водородный насос имеет высокий напор и небольшой расход. Кислородный насос по сравнению с водородным насосом имеет пониженный напор и повышенный расход. Из-за этого существенно отличаются частоты вращения водородного и кислородного насосов, обеспечивающие приемлемые коэффициенты быстроходности. Приемлемой одинаковой частоты вращения насосов можно достичь, уменьшая напор ступеней водородного насоса и понижая расход через ступень кислородного насоса. Это можно обеспечить, если водородный насос выполнить многоступенчатым, а кислородный насос – многопоточным.

Важным критерием выбора частоты вращения является также исключение парциального подвода газа на турбину.

В газовой турбине радиальная сила возникает при парциальном подводе газа и для асимметрично расположенных сопел оценивается выражением

$$R_r = \frac{N_m}{\sqrt{2} \cdot u} \cdot \sqrt{1 - \cos(2 \cdot \cdot)},$$

где

$u$  – окружная скорость на среднем диаметре рабочих лопаток турбины;

$\epsilon$  – степень парциальности, характеризующая отношение площадей участков среза всех сопел и венца турбины;

$N_m$  – мощность турбины.

Из приведённого выше выражения следует, что с увеличением числа сопел степень парциальности приближается к единице, а значение радиальной силы уменьшается до нуля.

Кроме того, наличие парциальности приводит к повышению динамических нагрузок на лопатки турбины.

ТНА является высокооборотным агрегатом. Довольно часто у специалистов, не занимающихся разработкой ТНА, выбор высокой частоты вращения вызывает недоумение. При этом не учитывается, что выбор частоты вращения подчинён достижению высокой экономичности и минимальной массы и габаритов ТНА.

Положительными сторонами повышенной частоты вращения ротора являются:

- увеличение напора, создаваемого одной ступенью насоса;
- увеличение коэффициента быстроходности, а следовательно, и КПД насоса;
- увеличение коэффициента быстроходности турбины, что приводит к повышению КПД турбины из-за увеличения высоты лопатки и связанного с этим уменьшения концевых потерь;
- увеличение для двигателей малых тяг степени парциальности турбины, что повышает ее КПД;
- снижение осевых и радиальных нагрузок на ротор из-за уменьшения его габаритов;
- снижение осевых нагрузок, действующих на корпусные детали и разъёмы корпусов;
- уменьшение осевых деформаций корпусов из-за уменьшения их радиальных размеров;
- уменьшение массы и радиальных габаритов ТНА.

Отрицательными сторонами повышенной частоты вращения роторов ТНА являются:

- повышенное потребное входное давление (повышенный потребный напор насосов БТНА);
- повышенная быстроходность подшипников при заданном их типоразмере;
- повышенные напряжения в лопатках турбины;
- пониженные запасы по критическим оборотам роторов.

Следует иметь в виду, что снижение частоты вращения повышает крутящий момент на валу и требует увеличения

диаметра подшипника. Из-за дискретных значений диаметров стандартных подшипников, наличия посадочных поверхностей и шлицевых соединений снижение частоты вращения в малоразмерных ТНА одноблочной схемы может не привести к снижению быстроходности подшипников.

Безусловно, частота вращения оказывает влияние на работоспособность и долговечность элементов конструкции ТНА, но определяющими параметрами для ТНА, влияющими на напряженность, являются:

- давление в полостях насосов и турбины;
- температура рабочего газа турбины;
- окружные скорости рабочих колес насоса и турбины;
- напряжения в лопатках турбины;
- динамические характеристики ротора;
- быстроходность подшипников.

Среди этих параметров только быстроходность подшипников и напряжения от центробежных сил в рабочих лопатках турбины зависят от частоты вращения. Практика показывает, что долговечность или периодичность ремонта ТНА двигателей многократного использования определяются подшипниками и рабочими лопатками турбины.

В ЖРД, используемых в верхних ступенях, долговечность подшипников должна составлять около одного часа при их быстроходности  $D_{cp} \cdot n = (2 \dots 3) \cdot 10^6$  мм·об/мин ( $D_{cp}$  – средний диаметр подшипника) [6]. В КБХА отработана базовая конструкция шарикоподшипников с быстроходностью  $(3,1 \dots 3,6) \cdot 10^6$  мм·об/мин, обеспечивающая решение этой задачи.

Долговечность рабочих лопаток турбины определяется в основном двумя факторами: температурой рабочего газа и напряжениями в лопатках от центробежных сил. Отработка ТНА кислородно-водородного ЖРД РД-0120 показала, что температура рабочего газа оказывает существенное влияние на долговечность рабочих лопаток. Уровень температуры не только влияет на механические характеристики материалов, с ним связаны также

термические напряжения, возникающие при запуске и выключении двигателя, и термические напряжения, вызванные утечками низкотемпературного водорода из насоса в полость турбины. В процессе отработки ТНА двигателя РД-0120 для колёс турбины в КБХА были отработаны технологии, конструкционные материалы и конструктивные мероприятия, существенно повышающие долговечность рабочих лопаток, работающих в условиях относительно высокой температуры рабочего газа. Однако двигатели безгенераторной схемы обладают несомненным достоинством, обусловленным низкой температурой рабочего газа турбины.

Напряжения от центробежных сил в корневом сечении лопатки постоянного по высоте лопатки сечения подчиняются зависимости [5]

$$= const \cdot n^2 \cdot F_T,$$

где

$n$  – частота вращения;

$F_T$  – осевая площадь проходного сечения колеса.

В табл. 1 приведены значения параметра  $n^2 F_T$  для ЖРД РД-0120, РД-0146 и ЯРД РД-0410. Видно, что напряжённость лопаток в ЖРД РД-0146 и РД-0120 существенно выше, чем в ЯРД РД-0410. Несмотря на высокое значение параметра  $n^2 F_T$  в двигателе РД-0146, для двигателей безгенераторной схемы из-за низкой температуры рабочего газа турбины обеспечение прочности рабочих лопаток не является проблемой.

Таблица 1. Значения  $N^2 F_T$  для различных двигателей

Двигатели	$N^2 F_T$ (об/мин) <sup>2</sup> ·мм <sup>2</sup> ·10 <sup>-12</sup> ,
ЖРД РД-0120	23,3
ЖРД РД-0146	27,9
ГТНА для RL-10	15,5
ЯРД РД-0410	13,8

Следовательно, долговечность шарикоподшипников и напряжённость рабочих лопаток турбины не являются в настоящее время критическими параметрами при выборе частоты вращения ТНА дви-

гателей безгенераторной схемы.

При выборе частоты вращения необходимо иметь в виду, что в соответствие с (1) напряжения от центробежных сил в рабочих лопатках существенным образом зависят от частоты вращения (пропорциональны квадрату частоты вращения) и не зависят от окружной скорости рабочего колеса.

В таблице 2 приведены параметры созданных в разное время и имеющих близкие значения водородных ТНА для ЯРД РД-410 и ЖРД РД-0146.

Таблица 2. Параметры двигателей

Наименование параметра	ЯРД РД-0410	ЖРД РД-0146
Год начала разработки	1965	1997
Расход через насос, кг/с	3,8	3,1
Давление на выходе насоса, МПа	224	265
Частота вращения, об/мин	65700	123000
Количество ступеней насоса	3	2
Окружная скорость крыльчаток насоса, м/с	413	548
Количество ступеней турбины	1	2
Степень парциальности турбины	0,56	1,0
Окружная скорость колёс турбины, м/с	468	452
Быстроходность подшипников ( $D_{cp} \cdot n$ ), мм·об/мин	2,2·10 <sup>6</sup>	3,08·10 <sup>6</sup>
Масса ТНА, кг	35	16,5

Так как роторы водородных ТНА имеют высокую частоту вращения ротора, они, как правило, закритические – рабочая частота вращения выше одной или двух критических частот вращения. При этом возникают проблемы динамики ротора, связанные с обеспечением допустимых прогибов и нагрузок в опорах.

В КБХА разработана методология создания быстроходных роторов ТНА, которая включает [7]:

- расчётное исследование динамических характеристик ротора при работе на стационарных режимах;

- расчётное исследование нестационарных колебаний ротора при запуске и

выключении двигателя;

- использование конструктивных мероприятий по обеспечению стабильности динамических характеристик ротора при многократных запусках и при его переборках;

- использование пластинчатых упруго-демпферных опор с высокой демпфирующей способностью. Такие опоры для ТНА двигателя РД-0120 были разработаны совместно КБХА и Самарским государственным аэрокосмическим университетом имени академика С.П. Королёва;

- использование в опорах ротора осевых пружин;

- балансировку ротора при рабочих частотах вращения на специальном вакуумном разгонно-балансирующем стенде (рис. 9).



Рис. 9. Ротор в приспособлении на разгонно-балансирующем стенде

При проектировании турбонасосных агрегатов ЖРД всегда возникает достаточно сложная инженерная задача по предотвращению всех тех нежелательных явлений, которые могут возникнуть в роторе при его вращении. Одним из таких явлений в роторе является критическая частота вращения (КЧВ) ротора в зоне рабочих оборотов. КЧВ – частота, при которой наступает равенство центробежных сил ротора и сил упругости вала и резко возрастает амплитуда колебаний поверхностей ротора. В простейшем случае КЧВ совпадает с частотой собственных поперечных колебаний ротора, их называют главными критическими скоростями. При КЧВ вал ротора теряет изгибную жёсткость, и даже малая сила может вызвать появление значительных прогибов вала и нагрузок в опорах. Для роторов турбонасосных агрегатов ЖРД запас по КЧВ –

$$k_c = \frac{|n_d - n_{кр}|}{n_d} \cdot 100\% \text{ должен быть не менее } 20$$

% ( $n_{кр}$ ,  $n_p$  – критическая и рабочая частоты вращения).

Для быстроходных роторов водородных насосов, установленных на подшипники качения, жёсткость опор соизмерима с жёсткостью вала и опоры вовлекаются в колебания. В общем случае пружина, имитирующая шарикоподшипниковую опору, имеет нелинейную характеристику. В некоторых случаях для смещения КЧВ из рабочего диапазона частот целесообразно идти не по пути ужесточения подшипниковых опор, а по пути введения в опоры дополнительных упруго-податливых элементов, обладающих определённым демпфированием, со значительным снижением жёсткости опор. При этом могут быть реализованы следующие преимущества перед ротором без упруго-демпферных элементов:

- самоцентрирование ротора за КЧВ;
- уменьшение прогибов вала и нагрузок на опоры при переходе через КЧВ;
- подавление самовозбуждающихся колебаний;
- локализация колебаний ротора.

В конструкциях водородных ТНА часто применяют относительно жёсткий ротор, закреплённый на податливых опорах. При демпфировании в опорах с коэффициентом рассеяния  $\geq 1$  в роторе отсутствуют как нежелательные вибрации, так и «зависание» ротора на критических частотах. Достаточно высокое демпфирование в опорах, которым, например, обладают пластинчатые упруго-демпферные опоры, снижает часть мощности, затрачиваемой на поддержание колебаний. Поэтому наличие демпфирования в опорах следует рассматривать как крайне полезное мероприятие, способствующее улучшению динамических характеристик ротора.

Как правило, критические скорости – дискретные значения скоростей, при которых возникают колебания с большой амплитудой. Однако, если ротор имеет нелинейные или периодически меняю-



щиеся при его вращении параметры, могут возникнуть автоколебания, при которых возможно существование интервалов скоростей, в которых ротор работает неспокойно с большими амплитудами колебаний. Эти интервалы называют областями неустойчивости. При определённых условиях ротор ТНА может быть подвержен автоколебаниям в основном из-за газодинамических сил в турбине и гидродинамических сил в щелевых уплотнениях ротора. Характерно затягивание зоны автоколебаний в область меньших чисел оборотов при выбеге.

Если ротор имеет нелинейные параметры, то возможно существование целого ряда критических скоростей, которые по принятой в нелинейной механике терминологии называют субгармоническими, ультрагармоническими, ультрасубгармоническими и комбинационными резонансами. Это критические скорости второго порядка. В большинстве случаев критические скорости второго порядка не опасны.

В общем случае при создании высокооборотных роторов могут выполняться следующие виды расчётных и проектно-экспериментальных работ:

- расчётное определение критических частот вращения ротора в зависимости от жёсткости опор, демпфирования в опорах, влияния уплотнений ротора;
- расчётное исследование динамических характеристик ротора при работе на стационарных режимах;
- расчётное исследование нестационарных колебаний ротора при запуске и выключении двигателя;
- проектирование ротора с использованием конструктивных мероприятий по обеспечению стабильности динамических характеристик;
- выбор и отработка оптимального способа изготовления роторных деталей;
- использование при необходимости упруго-демпферных опор с высокой демпфирующей способностью;
- низкочастотная динамическая балансировка составных частей ротора;
- низкочастотная динамическая ба-

лансировка собранного ротора;

- балансировка ротора при рабочих частотах вращения;
- контроль виброскоростей и виброускорений на корпусе агрегата.

При создании водородных ТНА были достигнуты существенные успехи в технологии изготовления ТНА, к которым относятся:

- горячее изостатическое прессование сложнопрофильных деталей из никелевых и титановых сплавов;
- высокоточные литые заготовки корпусов и рабочих колес из стали и никелевых сплавов;
- обработка отливок в газостате;
- электроэрозионная обработка блисков колес турбин;
- фрезерование шнеков с пространственными лопатками и переменным радиусом втулки;
- балансировка и испытания роторов в рабочем диапазоне частот вращения;
- ультразвуковой контроль затяжки резьбовых соединений.

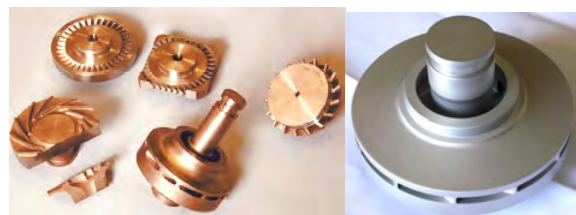


Рис. 10. Заготовки, полученные при горячем изостатическом прессовании

Основными преимуществами использования метода горячего изостатического прессования при изготовлении деталей агрегатов подачи ЖРД являются:

- возможность получения заготовок с формированием внутренних поверхностей сложной конфигурации без последующей механической обработки (рис. 10);
- получение деталей с высокой степенью сплошности, однородности и изотропности механических свойств материала;
- получение механических свойств, превосходящих свойства деформированного материала;

– высокий уровень коэффициента использования материала.

В своё время опыт КБХА по созданию ГНА для ЖРД РД-0410 использовался при разработке системы подачи ЖРД РД-0120. В настоящее время КБХА приобрёл значительный опыт при создании систем подачи водорода для ЖРД РД-0146 и ГТНА для RL-10. Основные составляющие этого опыта:

– методика расчётно-экспериментальных исследований в обеспечении требуемого ресурса с учётом влияния водорода на прочностные характеристики материалов;

– экспериментальная база данных о характеристиках конструкционных материалов в среде водорода;

– технологии газостатического пресования деталей сложного профиля из никелевых и титановых сплавов;

– система мероприятий по обеспечению работоспособности гибких роторов;

– ультразвуковой контроль затяжки резьбовых соединений высоконагруженных фланцевых разъемов;

– методика отработки агрегатов в составе «холодного» двигателя.

Опыт КБХА является фундаментальной основой создания систем подачи водорода для современных жидкостных и ядерных ракетных двигателей.

### Библиографический список

1. A. Dmitrenko, N. Zaitcev, A. Kravchenko, V. Pershin. Evolution of Liquid Rocket Engine Turbopump Design. Propulsion in Space Transportation. 5<sup>th</sup> Symposium International. 1996. Paris.

2. Белогуров, А. И. Ядерный ракетный двигатель РД0410 и ядерные энерго-двигательные установки на его основе [Текст] / А. И. Белогуров, Л. Н. Григоренко, В. С. Рачук // Научно-технический юбилейный сборник / КБ химавтоматики. – ИПФ «Воронеж», 2001.

3. V. Rachuk, N. Titkov. RD-0146: The first LOX-LH2 expander cycle liquid rocket engine in Russia. AIAA paper 2006-4904.

4. Demyanenko Y., Dmitrenko A., Rachuk V., Shostak A., Minick A., Bracken R., Buser M. Single-Shaft Turbopumps in Liquid Rocket Engines. AIAA paper 2006-4377.

5. Холщевников, К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. 2-е изд. перераб. и доп. [Текст] / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986.

6. Демьяненко, Ю. В. Водородные турбонасосные агрегаты для подачи жидкого водорода в космических двигательных установках [Текст] / Ю. В. Демьяненко, А. И. Дмитренко, В. К. Першин, В. С. Рачук // Труды Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005». – Москва, 2005.

7. Дмитренко, А. И. Динамика роторов водородных насосов турбонасосных агрегатов ЖРД [Текст] / А. И. Дмитренко, В. Н. Попов, М. А. Рудис, В. Я. Свистов // Труды пятого Международного аэрокосмического конгресса IAC'06. – Москва, 2006.

### References

1. A. Dmitrenko, N. Zaitcev, A. Kravchenko, V. Pershin. Evolution of Liquid Rocket Engine Turbopump Design. Propulsion in Space Transportation. 5<sup>th</sup> Symposium International. 1996. Paris.

2. Belogurov A.I., Grigorenko L.N., Racuk V.S. Nuclear rocket engine RD-0410 and nuclear power generating unit based on it. Anniversary scientific-technical edition. KB khimavtomatiki – IPF Voronezh, 2001.

3. V. Rachuk, N. Titkov. RD-0146: The first LOX-LH2 expander cycle liquid rocket engine in Russia. AIAA paper 2006-4904.

4. Demyanenko Y., Dmitrenko A., Rachuk V., Shostak A., Minick A., Bracken R., Buser M. Single-Shaft Turbopumps in Liquid Rocket Engines. AIAA paper 2006-4377.

5. Holshchevnikov K.V., Yemin O.N., Mitrokhin V.T. Theory and calculation of a aviation impeller machines. 2-nd edition. – M. Mashinostroenie, 1986.

6. Demyanenko Y.V., Dmitrenko A. I., Pershin V.K., Rachuk V.S. Hydrogen delivering turbopumps for space propulsion systems. International conference "Nuclear power in space – 2005". Moscow, 2005.

7. Dmitrenko A.I., Popov V.N., Rudis M.A., Svistov V.Y. LRE turbopump hydrogen pump rotor dynamics. International aerospace congress IAC'06. Moscow, 2006.

## DEVELOPMENT OF TURBOPUMP UNIT DESIGN FOR HYDROGEN LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES WITHOUT GENERATORS DEVELOPED AT THE DESIGN BUREAU OF CHEMICAL AUTOMATION

© 2010 A. I. Dmitrenko, A. V. Ivanov, V. S. Ratchuk

Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh

The task of producing oxygen-hydrogen and oxygen-methane engines of the new generation designed without generators is urgent today. The turbopump unit is one of the main components of any engine. The paper is devoted to the development of turbopump unit design for engines without generators developed at the Design Bureau.

*Rocket engine, liquid-propellant rocket engines, turbopump unit, pump, turbine, rotor, oxygen, hydrogen.*

### Информация об авторах

**Дмитренко Анатолий Иванович**, кандидат технических наук, главный конструктор по агрегатам систем питания КБХА. Область научных интересов: агрегаты системы питания - проектирование, испытания, доводка, динамика роторов. E-mail: [cadb@comch.ru](mailto:cadb@comch.ru).

**Иванов Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, зам. главного конструктора по агрегатам систем питания КБХА. Область научных интересов: турбонасосные агрегаты, динамика роторов, уплотнения проточной части. E-mail: [iav308@inbox.ru](mailto:iav308@inbox.ru).

**Рачук Владимир Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор – генеральный конструктор КБХА. Область научных интересов: создание, исследования и отработка жидкостных и ядерных ракетных двигателей. E-mail: [cadb@comch.ru](mailto:cadb@comch.ru).

**Dmitrenko Anatoly Ivanovich**, candidate of technical sciences, KBKhA chief designer of feed systems. Area of research: design and development of feed system units, rotor dynamics. E-mail: [cadb@comch.ru](mailto:cadb@comch.ru).

**Ivanov Andrey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, KBKhA deputy chief designer of feed systems. Area of research: turbopumps, rotor dynamics, flow path seals. E-mail: [iav308@inbox.ru](mailto:iav308@inbox.ru).

**Rachuk Vladimir Sergeevich**, doctor of technical sciences, professor, KBKhA general director – general designer. Area of research: design and development of liquid and nuclear rocket engines. E-mail: [cadb@comch.ru](mailto:cadb@comch.ru).