

УДК 621.454.2.035.5

Л.Ф. ИВЧЕНКО, С.А. ДЕШЕВЫХ, Р.Ф. МАКСИМЧУК**ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля»**

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ ТУРБИНЫ ТНА ДВИГАТЕЛЯ РД861К

Описывается конструкция газовой турбины турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) РД861К, выполненного по открытой схеме и предназначенного для установки на 3-ю ступень ракеты-носителя «Циклон-4». Прототипом для данной конструкции была турбина ТНА двигателя-прототипа РД861. Однако высокие эксплуатационные требования повлекли за собой необходимость существенно изменить конструкцию по сравнению с прототипом. В новой конструкции существенно снижена консоль турбины, выполнен более эффективно отвод газа, специально была создана новая конструкция соплового аппарата, позволившая рационально разместить сопла и имеющая минимальные габариты и вес. В результате проведенных мероприятий удалось достичь значения удельной мощности одноступенчатой турбины 940 л.с./(кг/с) и выше. При этом также удалось по сравнению с прототипом повысить ресурс по времени работы и количеству запусков.

Ключевые слова: турбина, сопловой аппарат, рабочее колесо, выхлопной коллектор, сопло, консоль, уплотнение.

Введение

В настоящее время возросли требования к ЖРД по массовым, энергетическим характеристикам, а также по многократности включений. В двигателях с насосной подачей обеспечение этих требований, во многом, зависит от характеристик турбины: удельной мощности, веса, надежности, ресурса работы и т. д.

В КБ «Южное» накоплен большой опыт по проектированию автономных турбин для ЖРД, а также турбин для БИМОВ. На основании этого опыта отработаны различные конструкции основных узлов турбины и выявлены их эксплуатационные характеристики. Этот опыт позволяет создавать более совершенные новые конструкции и уменьшить затраты на их создание.

Одним из примеров создания такой конструкции является турбина турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя РД861К, тягой 8 т.с.

Формально считается, что у двигателя РД861К есть прототип – это двигатель РД861, разработанный ещё в 70-е годы прошлого столетия. Другими словами, двигатель РД861К – это модернизированный РД861, с несколько увеличенной тягой и повышенной экономичностью. Однако так называемая «модернизация» существенно изменила облик двигателя, в частности разработана новая конструкция турбины.

Пути повышения эксплуатационных характеристик турбины остались прежними – повышение окружной скорости, частоты вращения, перепада

давления, температуры газа на входе, уменьшение утечек и т.д.

На деле при создании новой конструкции турбины это выливается в необходимость решать следующие типичные задачи:

- уменьшение консоли турбины (при консольном расположении турбины);
- организация эффективного выхлопа из турбины;
- рациональное размещение основных и пусковых сопел;
- обеспечение многократности запуска;
- разработку конструкции соединения турбины с насосом.

Кроме того, возникает много других частных задач, таких как крепление колеса турбины к валу, передача крутящего момента, уплотнения и др.

Ниже описано, как решались эти задачи при проектировании турбины ТНА двигателя РД861К

1. Описание конструкции

На рис. 1 представлена конструкция турбины. Как и любая другая турбина, она состоит из трех основных узлов: соплового аппарата 1, рабочего колеса 2 и выхлопного коллектора 3. Впервые в практике ЖРД для изготовления рабочего колеса турбины использовался сплав ЭП 975, сочетающий в себе хорошие прочностные характеристики, жаропрочность и достаточно высокую пластичность. Лопатки турбины выполняются электроэрозионной обработкой на 5-ти координатном станке.

Сопловой аппарат 1 крепится к корпусу насоса 4 сваркой, и вместе они составляют монолитную конструкцию. Такое крепление дает минимальные габариты и вес конструкции. Выхлопной коллектор 3 с сопловым аппаратом 1 также соединяется сваркой. Рабочее колесо 2 крепится к валу при помощи болта 5. В корпусе насоса 4 установлен подшипник 6, который зажимается через корпус уплотнений 7 и крышку 8 болтами 9.

В качестве уплотнений по валу между полостями насоса и турбины используется импеллер 10, который работает только тогда, когда ротор вращается, и графитовое кольцо 11, которое снижает утечки из насоса во время запуска. Кроме этого, для устранения утечек через радиальный зазор между корпусом насоса 4 и корпусом уплотнений 7 используется резиновое кольцо 12.

Через патрубок 13 осуществляется переборос жидкости после охлаждения и смазки подшипника 6 на вход в насос. Через патрубок 14 осуществляется подача охлаждающей жидкости в полость турбины в период после останова, перед повторным запуском. Охлаждающая жидкость через канал 15 поступает в кольцевой коллектор 16 и через отверстия в стенке 17 попадает в полость турбины, где она отбирает тепло от горячих частей и, испаряясь, идет на выход из турбины.

Рабочее тело (газ) в турбину поступает через входной патрубок 18 во входной коллектор 19, далее расширяется в соплах и поступает на лопатки рабочего колеса. На запуске через патрубок 20 и входной коллектор 21 в турбину поступает пусковое рабочее тело. Входные коллектора выполнены по всей окружности, concentрично друг другу.

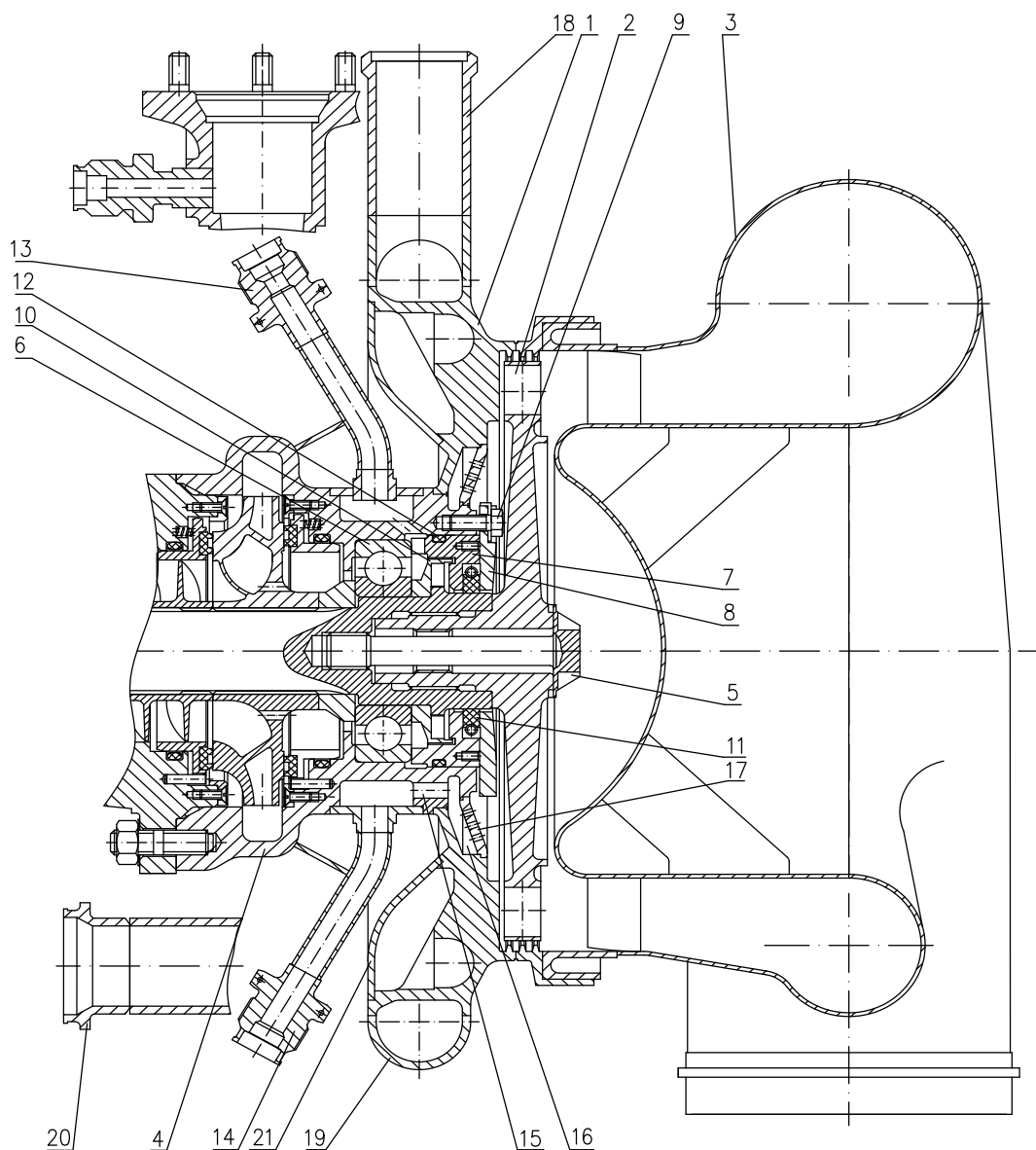


Рис. 1. Конструкция турбины ТНА двигателя РД861К

2. Описание мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик турбины

2.1. Уменьшение консоли турбины

Большое влияние на характеристики турбины имеет расстояние от подшипника до рабочего колеса турбины, т.е., длина консольной части. С одной стороны, чем меньше консольная часть, тем жестче будет ротор и больше запас по критическим оборотам. Это дает возможность увеличить окружную скорость на лопатках колеса за счет увеличения частоты вращения или за счет увеличения диаметра колеса. Однако уменьшение консольной части ограничивается необходимостью установки уплотнений между полостями насоса и турбины, а также необходимостью предусмотреть места для соединения соплового аппарата с корпусом насоса, установки коллекторов и патрубков входа. Кроме того, чем ближе подшипник к турбине, тем сильнее может оказаться тепловое воздействие на него. Необходимо эффективно организовывать охлаждение подшипника, а также предусмотреть, чтобы тепловые деформации от соплового аппарата не передавались на насос.

По сравнению с прототипом, удалось существенно снизить длину консольной части. Если в РД861 она составляла 52 мм, то в РД861К всего 42 мм. Достигнуто это было за счет замены фланцевого соединения

на сварное и за счет применения новой конструкции соплового аппарата. Конструкция соплового аппарата описана далее

Уменьшение консоли не привело к перегреву. Во время работы через насос и подшипник проходит достаточное количество компонента, а после останова специально предусмотрено охлаждение турбины. Тепловые деформации, возникающие от нагрева турбины, также рассмотрены далее.

2.2. Сопловой аппарат турбины

Сопловой аппарат (рис. 2) имеет основные и пусковые сопла. Сопла в сопловом аппарате размещаются группами, расположенными симметрично относительно оси. Всего имеется две группы основных и пусковых сопел. Симметричное расположение сопел необходимо для того, чтобы не возникал дополнительный изгибающий момент на рабочем колесе, из-за которого повышается радиальная сила в подшипнике. Основное и пусковое сопло имеют разное конструктивное исполнение: дозвуковая часть основных сопел выполнена соосно со сверхзвуковой, а у пусковых она выполнена под углом. Благодаря этому, для каждой группы сопел не нужно делать отдельный входной коллектор и подводный патрубок, так как входные коллектора для обоих типов сопел можно сделать по всей окружности концентрично друг другу. Это позволило выполнить сопловой аппарат с минимальными габаритами и весом.

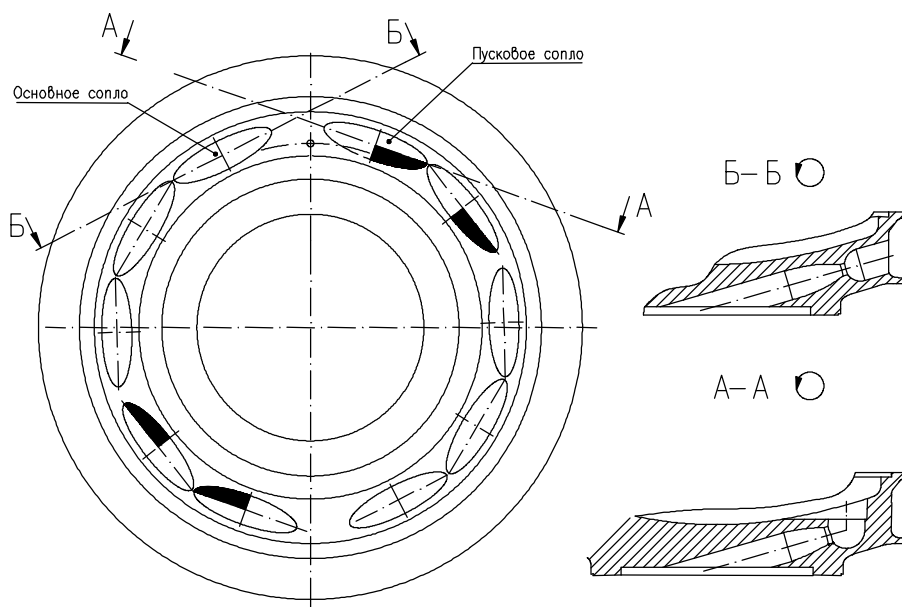


Рис. 2. Сопловой аппарат

Выполненная конструкция соплового аппарата защищена патентом Украины на полезную модель №55023. Данное техническое решение можно также использовать в конструкциях паровых турбин с сопловым парораспределением.

За счет уменьшения консольной части удалось достичь окружной скорости на среднем диаметре рабочего колеса 300 м/с на номинальном режиме и за счет этого повысить энергетику турбины. Фактически при испытаниях окружная скорость доходила до

326 м/с на форсированных режимах. На периферии скорости составляли 326 и 363 м/с соответственно.

2.3. Выхлопной коллектор

Второе по значимости мероприятие по повышению экономичности турбины – организация эффективного выхлопа – обеспечивается за счет применения спирального выхлопного коллектора. Обычно в турбинах ЖРД ранее такие выхлопные коллекторы использовались редко в виду более высокого веса и, что главное, своей сложности. Например, при создании турбины для ЖРД 11Д410, предназначавшегося для блока Е ракеты Н-1, испытывался и такой тип выхлопного коллектора. Были получены хорошие результаты, экономичность турбины существенно возрастала. Но предпочтение все-таки было отдано более простой торовой конструкции. В некоторых других турбинах, где требования по надежности были ниже, использовались коллектора, похожие на спиральный, но несколько упрощенные.

Другой особенностью является то, что турбина двигателя РД861К высокоперепадная и одноступенчатая, вследствие чего скорость на выходе из рабочего колеса сверхзвуковая. В практике КБ «Южное» это первый случай, чтобы в высокоперепадной одноступенчатой турбине использовали спиральный выхлопной коллектор.

Для турбины РД861К спиральный сборник в выхлопном коллекторе выполняли без упрощений. Площадь поперечного сечения спирального сборника меняется по формуле:

$$F(\varphi) = F_{\text{вых}} \cdot (1 - \varphi/360)$$

где: $F(\varphi)$ – площадь поперечного сечения спирального сборника; $F_{\text{вых}}$ – площадь сечения выхода спирального сборника (выходного патрубка); φ – угол расположения поперечного сечения спирального сборника относительно сечения выхода спирального сборника, град

Такое изменение площади более благоприятно для потока, чем в торовой сборнике.

3. Результаты испытаний

3.1. Энергетика турбины

Первые испытания турбины в составе двигателя показали стабильно высокие результаты. При проектировании рассчитывали получить удельную мощность 804 л.с./(кг/с). Реальная цифра на номинальном режиме составила 940 л.с./(кг/с), а на форсированных доходила до 1000 л.с./(кг/с).

Такое значение удельной мощности раньше было характерно для двухступенчатых турбин.

За весь период испытаний не возникало замечаний по состоянию лопаток и диска рабочего колеса, не смотря на высокие окружные скорости и температуру на входе в турбину: 880оС на номинальном режиме и 940оС при форсировании. Это открывает возможность к дальнейшему повышению энергетики турбины за счет увеличения окружных скоростей и повышения температуры на входе. На рис. 3 графически представлены значения удельных мощностей некоторых известных турбин ЖРД.

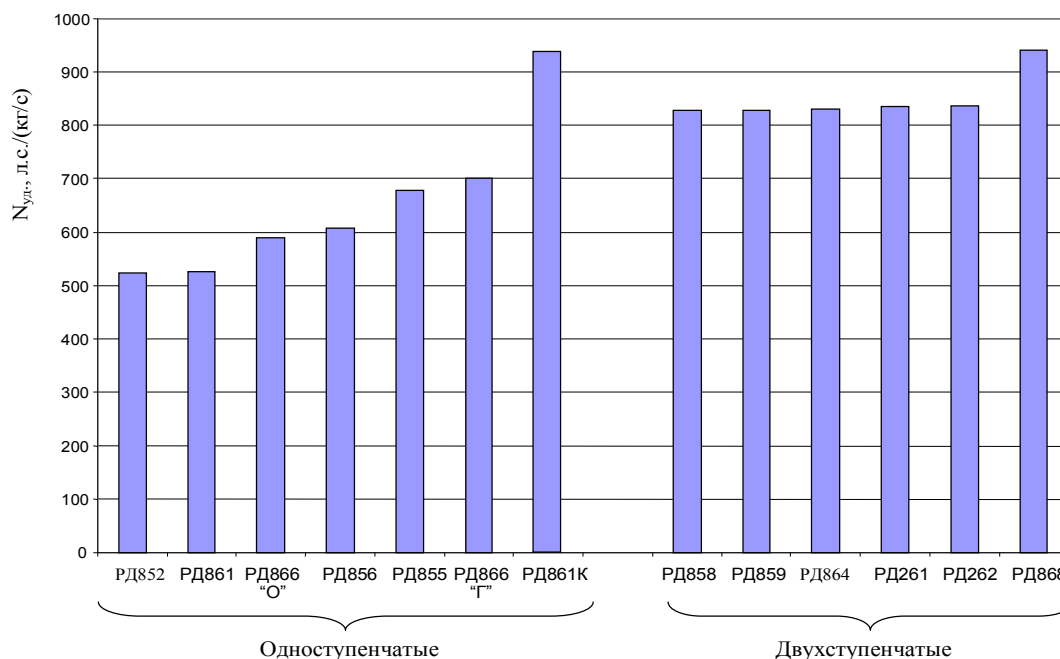


Рис. 3. Значения удельных мощностей турбин ЖРД

3.2. Тепловые деформации

Обмеры матчасти после длительных испытаний с многократными запусками показали, что в конструкции возникают существенные деформации соплового аппарата. Величина деформаций местами превышала 1 мм. Деформации приводили к появле-

нию трещин на перемычках сопел и в сварном шве стенки 17 с сопловым аппаратом 1 (рис. 1). Деформировалась также посадочная поверхность под подшипник, что приводило к сокращению его ресурса работы. Для устранения деформаций посадочной поверхности в конструкцию ввели компенсационный паз (рис. 4).

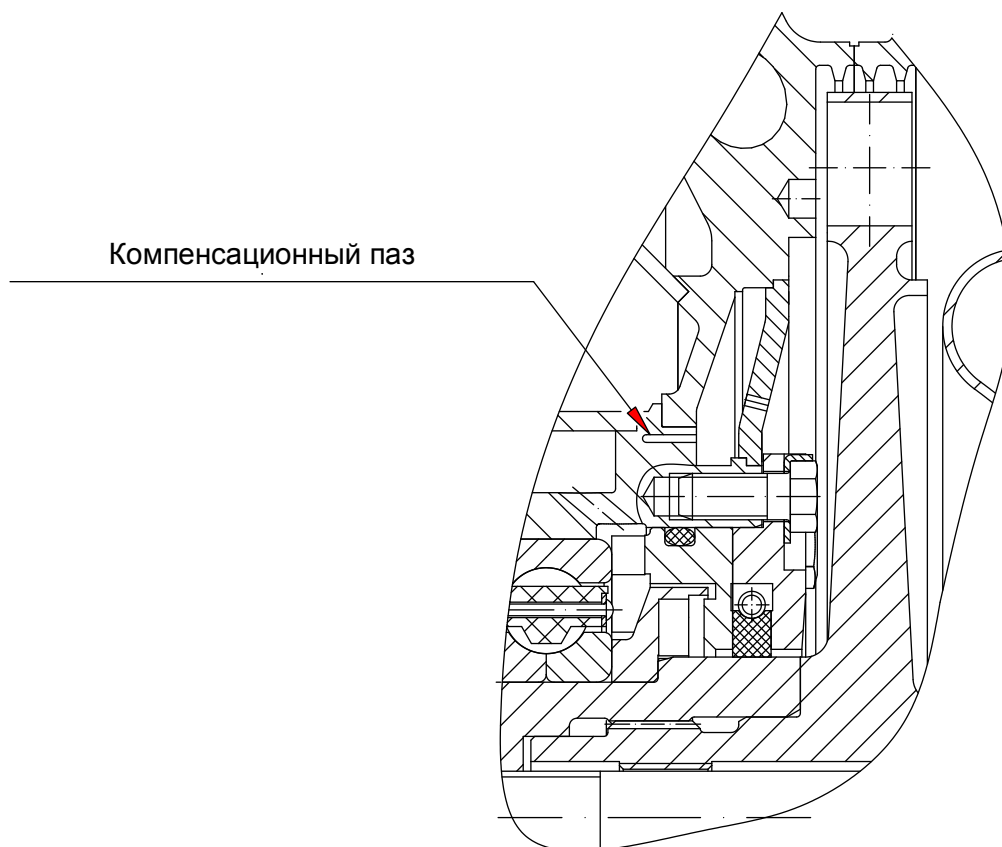


Рис. 4. Конструкция турбины после изменений

Пагубного влияния от деформаций соплового аппарата, а также трещин на перемычках и в сварном шве за весь период испытаний не выявлено.

3.3. Изменение конструкции по результатам отработки

По результатам отработки конструкция турбины существенно не изменилась. Кроме введения компенсационного паза, изменилась конструкция ротора в части того, чтобы рабочее колесо с валом не разбирать после балансировки, а в крышку ввели центрирующую поверхность за счет уменьшения корпуса уплотнений.

В результате всех изменений конструкция стала выглядеть так, как показано на рис. 4

Турбины такой конструкции прошли серию испытаний в составе двигателя. Такая конструкция обеспечивает трехкратный запас по ресурсу (1500 с)

и по количеству запусков (15 раз), что удовлетворяет требования технического задания

Заключение

При проектировании турбины были заложены конструктивные решения, которые гарантированно обеспечили требования технического задания, а достигнутые параметры в энергетике были получены даже выше.

В результате отработки конструкция практически осталась без изменений.

Высокие параметры были достигнуты, в основном, за счет уменьшения консоли турбины, которое позволило повысить окружную скорость, и за счет организации эффективного выхлопа из турбины.

В будущем перспективными видятся исследования по дальнейшему увеличению окружных скоростей и применению различных конструкций ради-

ального уплотнения между рабочим колесом и сопловым аппаратом.

Представляет также интерес изучение деформаций соплового аппарата.

Литература

1. Пат. 55023 Україна, МПК F01D 17/00. Сопловий апарат турбіни / Івченко Л.Ф., Дешевих С.А., Максимчук Р.Ф.; заявник і власник: Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» – № u200708396; заявл. 26.01.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23. – 4 с.

2. Овсянников, Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 344 с.

3. Щегляев, А.В. Паровые турбины [Текст] / А.В. Щегляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 320 с.

4. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / А.Ш. Дорфман, М.М. Назарчук, Н.И. Польский, М.И. Сайковский. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – 188 с.

Поступила в редакцию 1.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А.Н. Петренко, ДНУ, Днепрпетровск, Украина.

ДОСВІД ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ТУРБІНИ ТНА ДВИГУНА РД861К

Л.Ф. Івченко, С.О. Дешевих, Р.Ф. Максимчук

Описується конструкція газової турбіни турбонасосного агрегату (ТНА) рідинного ракетного двигуна РД861К, виконаного за відкритою схемою й призначеного для установки на 3-ю ступень ракети-носія "Циклон-4". Прототипом для даної конструкції була турбіна ТНА двигуна-прототипу РД861. Однак високі експлуатаційні вимоги призвели до необхідності істотної зміни конструкції в порівнянні із прототипом. У новій конструкції істотно знижена консоль турбіни, виконаний більш ефективно відвід газу, спеціально була створена нова конструкція соплового апарату, яка дозволила раціонально розмістити сопла і має мінімальні габарити та вагу. У результаті проведених заходів вдалося досягти значення питомої потужності одноступеневої турбіни 940 л.с./(кг/с) і вище. При цьому також удалося в порівнянні із прототипом підвищити ресурс за часом роботи й кількістю запусків

Ключові слова: турбіна, сопловий апарат, робоче колесо, вихлопний колектор, сопло, консоль, ущільнення.

EXPERIENCE OF DESIGNING OF THE AUTONOMOUS TURBINE TPU ENGINE RD861K

L.F. Ivchenko, S.A. Deshevikh, R.F. Maximchuk

The design of the gas turbine turbopump the unit (TPU) the liquid rocket engine (LRE) RD861K, executed on the open scheme and intended for installation on 3rd step of a carrier rocket «Cyclon-4» is described. Engine-prototype RD861 turbine TPU was a prototype for the given design. However high operational requirements have caused necessity of essential change of a design in comparison with a prototype. In a new design the turbine console is essentially lowered, gas tap is executed more effectively, the new design nozzle has specially been created, allowed rationally to place nozzles both having the minimum dimensions and weight. As a result of the spent actions for the first time it was possible to reach values of specific capacity of the one-stage turbine 940 h.p./(kg/s) and above. Thus also it was possible to raise in comparison with a prototype a resource on an operating time and quantity of starts.

Key words: turbine, nozzle set, impeller, exhaust manifold, nozzle, console, seal.

Івченко Леонід Федорович – начальник отдела ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепрпетровск, Украина.

Дешевых Сергей Алексеевич – начальник сектора ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепрпетровск, Украина.

Максимчук Роман Фидосиевич – начальник группы ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепрпетровск, Украина.