

В.Ф. Слисаренко

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ РДТТ

*Рассмотрены органы управления вектором тяги, особенности проектирования и экспериментальной отработки наиболее сложных узлов и сборок органов управления специальных РДТТ для управления полетом верхних ступеней.*

*Розглянуто органи керування вектором тяги, особливості проектування й експериментального відпрацювання найбільш складних вузлів і складань органів керування спеціальних РДТП для керування польотом верхніх ступенів.*

*The thrust vector controls, peculiarities of designing and development testing of most sophisticated units and assemblies of controls of special SRM for upper stage flight control are considered.*

В настоящей статье изложены сведения и опыт проектирования, изготовления, отработки различных типов сопл и клапанов, работы по которым автор выполнял непосредственно сам или с коллективом КБ-5.

В период 1970–1975 гг. для управления полетом верхних ступеней был создан ряд РДТТ специального назначения.

Для верхней ступени была принята твердотопливная двигательная установка, выполненная по толкающей схеме с четырьмя вращающимися управляющими соплами (ВУС), установленными в плоскостях стабилизации.

В связи с продолжительным временем работы 150-500 с необходима работоспособность и характеристики сопл с учетом наличия производимых промышленностью жаропрочных сплавов, теплозащитных пластиков и графитовых материалов могли быть обеспечены при использовании твердых топлив с температурой горения не более 2000 К.

Традиционно ВУС содержит неподвижный корпус с фланцем крепления к газосборнику, установленному на заднее днище двигателя, подвижную часть с соплом, расположенным под углом 90° к оси вращения, шарикоподшипник в качестве подвески с поверхностями качения в неподвижной и подвижной частях. Используемые материалы: газовый тракт, стакан и вкладыш критического сечения – ниобиевый сплав ВН-2АЭ (или молибденовый сплав); теплоизоляция – пресс-материал П5-2; силовые металлические подвижный и неподвижный

корпуса – штамповки, сваренные между собой из титанового сплава ОТ4; кольца подшипника (изготовления ПО ЮМЗ) – сталь 20Х13; стандартные подшипниковые шарики, кронштейны для установки приводов – титановый сплав ОТ4 (или алюминиевый).

Для двигателя разведения 15Д171 с  $D_{кр}=11,4$  мм ( $T=1950$  К,  $P_к=54$  кгс/см<sup>2</sup>, полное время работы  $\tau=172$  с, угол вращения подвижной части  $\pm 60^\circ$ ) было разработано ВУС с наличием теплозащиты, устанавливаемой между жаростойкими деталями газового тракта и силового корпуса. В качестве подвижного уплотнения использованы два резиновых кольца круглого сечения, работающие в условиях жидкостного трения (консистентная смазка ЦИАТИМ-221). Конструкция сопла показана на рис. 1.

Первое испытание было неудачным из-за прорыва продуктов сгорания в зазор между деталями теплозащиты и корпуса (наличие 100 %-ного заполнения клеевым составом зазора не представляется возможным из-за отсутствия для этого технических средств и контроля качества клеевого шва). Самым простым решением было предложение герметизировать зазор в за критической части сопла – запрессовать в выходной конус металлическое кольцо с канавкой для резинового уплотнения, а в соответствующем месте подвижного корпуса приварить кольцо с последующей механической обработкой посадочной поверхности под уплотнение. Во время ОСИ была подтверждена правильность предложенного решения.

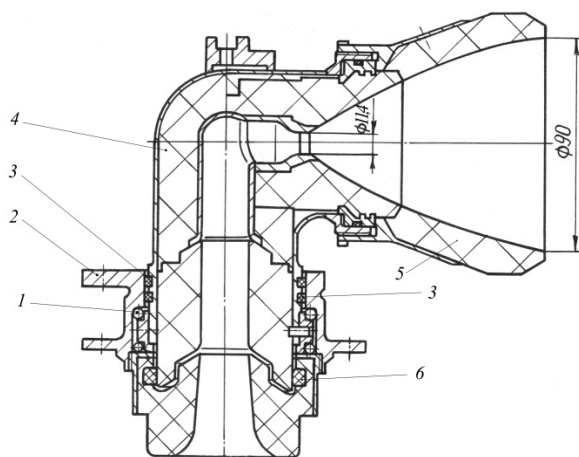


Рис. 1. Конструкция вращающегося сопла двигателя 15Д171:

- 1 – подшипник; 2 – неподвижная часть;
- 3 – уплотнение; 4 – подвижная часть;
- 5 – раструб; 6 – защитное кольцо

Отметим дальнейшие трудности, возникшие в процессе разработки и экспериментальной отработки двигателя 15Д171 с диаметром критического сечения сопла  $D_{кр}=11,4$  мм. По исходным данным проектного отдела вращающееся сопло первоначально было спроектировано для двигателя с температурой горения продуктов сгорания 1850 К, примененный для защиты деталей газового тракта ниобиевый сплав ВН-2АЭ в этих условиях был работоспособен. Однако в начале ОСИ обнаружилась нехватка удельного импульса двигателя. Разработчики заряда – подразделение КБ-5 – для повышения энергетике ввели в состав топлива феррацен без согласования с разработчиками ВУС. В условиях повышенной температуры на 100 К феррацен образует со сплавом ВН-2АЭ легкоплавкие эвтектики. В результате детали облицовки газового тракта оказались неработоспособными и вышли из строя.

Пришлось срочно менять материал на более стойкий молибденовый сплав, которого не было в наличии на ЮМЗ. Разработчик ВУС совместно с представителем заводского отдела снабжения был отправлен в ВИЛС (Всесоюзный институт легких сплавов, г. Москва) для оперативного выбора материала. В ВИЛСе был подобран и срочно доставлен в ПО ЮМЗ молибденовый сплав ВМ-2.

Изготовленные и установленные в ВУС стакан и вкладыш критического сечения из материала ВМ-2 на первом же испытании показали хорошую работоспособность. Далее в серийном производстве применялся аналогичный указанному выше молибденовый сплав ММП, который также был работоспособен.

Перечислим следующие улучшения, выполненные в процессе ОСИ: вместо жесткого 4-секционного пластмассового защитного кольца установлено эластичное кольцо из вольфрамовой сетки и угольной ткани, введена пропитка резиновых уплотнительных колец ионным раствором солей брома. Как результат, момент трения уменьшился в два раза.

За резиновыми кольцами в канавки установлены фторопластовые кольца, препятствующие выдавливанию резиновых колец в зазор между подвижными и неподвижными частями. Таким образом был снижен максимальный шарнирный момент и получена его стабильность.

Еще один пример несерьезного отношения к проектной разработке при выпуске конструкторской документации на ВУС по проектным исходным данным заключался в том, что кронштейн крепления рулевого привода (РП) должны были изготавливать из алюминиевого или титанового листа толщиной 2 мм. По техническому указанию, выданному производству проектантом, был изготовлен прочный и легкий экспериментальный экземпляр кронштейна массой 0,2 кг из титанового сплава ОТ4, но при выпуске рабочей документации без согласования с разработчиками проекта был выпущен чертеж, согласованный с цехом литья, где применялся алюминиевый сплав АЛ-4 с толщиной стенки  $5_{-1}^{+2}$  мм и более, при этом масса кронштейна составила 0,8 кг. Таким образом, на верхнюю ступень необоснованно была добавлена масса 2,4 кг.

В процессе создания всех конструкций ВУС и клапанов низкотемпературных РДТТ применялись сварные конструкции кронштейнов из листа титанового сплава ОТ4.

К началу разработки четырехсоплового блока с ВУС для следующего двигателя 15Д161 ( $D_{кр}=24,7$  мм) был использован опыт создания сопла с  $D_{кр}=11,4$  мм. Стало понятно, что для сопел ббльших габаритов использование резиновых уплотнительных колец приведет к значительному росту момента трения сопла.

Поэтому с целью улучшения характеристик было предложено перенести подвижное уплотнение на возможно меньший диаметр, близкий к диаметру газового потока (докритическая часть сопла), и таким образом уменьшить значение шарнирного момента и массу РП и ВУС. В этом случае уплотнительный узел необходимо было выполнить из жаропрочных сплавов ниобия и молибдена, а также применить материалы для пар трения (скольжения) с минимальным коэффициентом трения.

По договору с Днепропетровским химико-технологическим институтом (ДХТИ) были проведены исследования различных материалов для пар трения, основными из которых были пары ниобиевый сплав ВН-2АЭ – псевдосплав ВНДС-1 и ниобиевый сплав ВН-2АЭ – углеситалл УСБ-15.

Была разработана опытная конструкция ВУС (рис. 2). Для уплотнения зазора между неподвижной и подвижной частями использовали сплав ВН-2АЭ и два уплотнительных кольца из углеситалла УСБ-15 (у этой пары материалов при исследованиях в ДХТИ был получен коэффициент трения  $f \leq 0,05$ ). ВУС было изготовлено в лучшем цехе ПО ЮМЗ – цехе по производству РП. При испытаниях на модельном двигателе была получена удовлетворительная работоспособность и шарнирный момент не более 0,8 кгс·м.

Далее был разработан сопловой блок четырех ВУС для РДТТ 15Д161 ( $D_{кр}=24,7$  мм,  $T_k=1850$  К, время работы  $\tau=170$  с,  $P_k=55$  кгс/см<sup>2</sup>, угол вращения подвижной части  $\pm 70^\circ$ ). Поскольку этот двигатель (включая ВУС) изготавливали на Павлоградском механическом заводе (ПМЗ), при ОСИ в соплах был получен шарнирный момент  $M_{ш} \approx 1,2$  кгс·м. В технической документации для ОСИ было заложено значение шарнирного момента  $M_{ш} \leq 1,5$  кгс·м.

После испытаний сопел изготовления ПМЗ в результате углового отклонения оси подвижной части из-за торцевых зазоров в шарикоподшипнике собственного производства уплотнительное кольцо из углеситалла УСБ-15 имело следы поверхностных растрескиваний. Поэтому этот материал был заменен на псевдосплав ВНДС-1, чем объясняется повышенное значение  $M_{ш}$  по сравнению с опытной конструкцией.

Зазор между неподвижной и подвижной частями уплотняли по наружному диаметру 42Пр для уплотнительного кольца и 42А для подвижной части. В уплотнительном кольце выполнялся косой разрез под углом  $45^\circ$  шириной  $0,45^{+0,05}$  мм. При серийном изготовлении ВУС выполнялся прямой разрез шириной 0,9 мм. Для сравнения: в цехе производства приводов ПО ЮМЗ разрез составил 0,1 мм, а в цехе производства клапанов ПО ЮМЗ, где позже изготавливали наши экспериментальные клапанные устройства, – 0,05 мм (зазор между подвижной и неподвижной частями уплотнялся по внутреннему диаметру кольца и наружному диаметру подвижного вала). Это важно, поскольку размер разреза в кольце определяет значение травления горячего газа через зазор.

В конструкции уплотнительного узла перед кольцами устанавливалось защитное кольцо из вольфрамовой сетки и угольной ткани. В процессе отработки на доводочном этапе защитное кольцо было преобразовано в фильтр из вольфрамовой сетки, промышленное производство которого было организовано в Институте проблем материаловедения АН УССР, где фильтры были изготовлены на всю программу серийного производства.

В этом оказал большую помощь автор технологии прессования фильтров и исполнитель этой важной работы научный сотрудник ИПМ АН УССР В.И. Величко.

Установка специального кольца и фильтра в канале газохода в зазоре позволила значительно уменьшить загрязнение узла уплотнения твердыми частицами продуктов сгорания и стабилизировать момент трения на первых секундах работы.

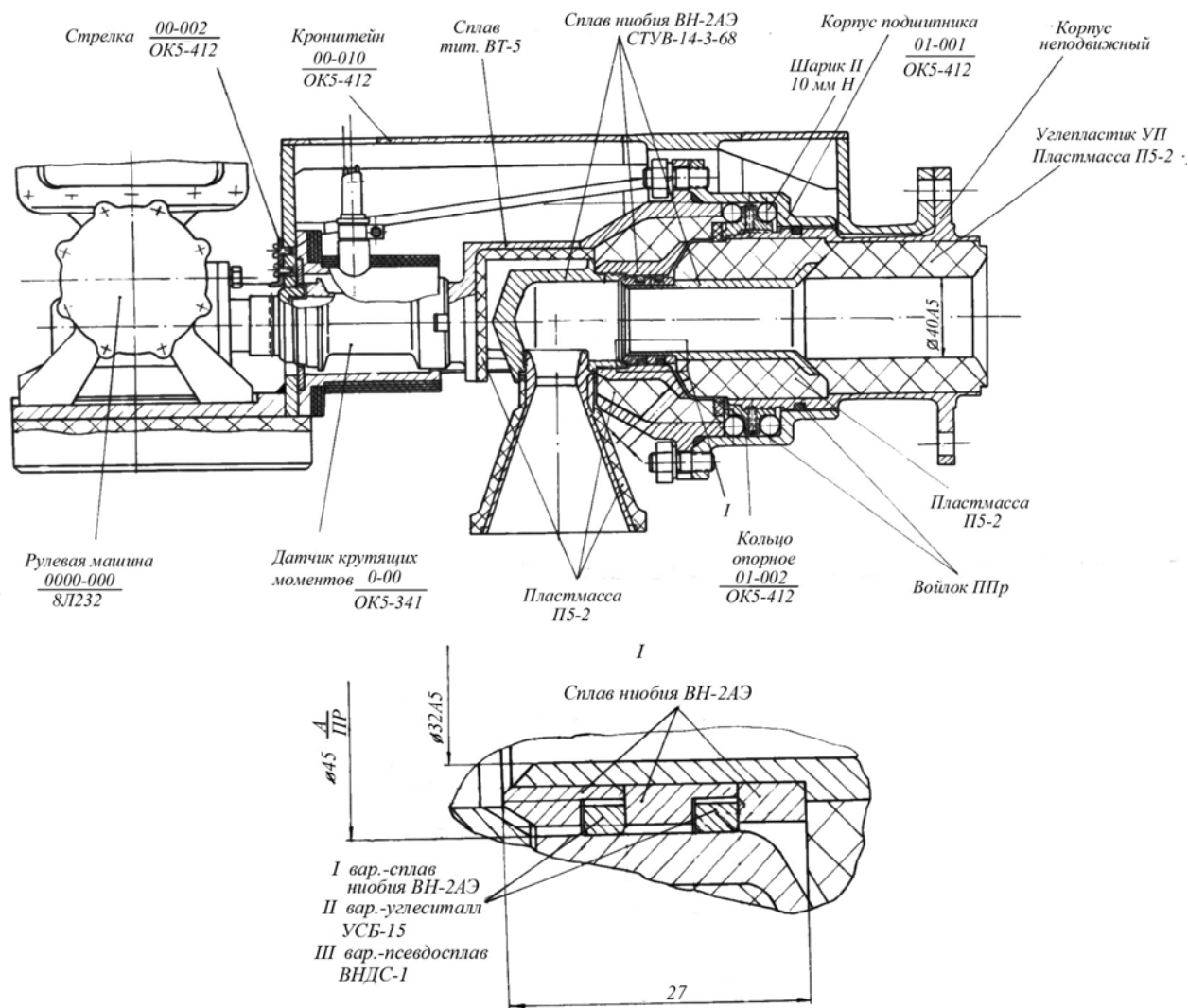


Рис. 2. Опытная конструкция ВУС

В усовершенствованном маломоментном ВУС (рис. 3), разработанном для РДТТ 15Д221 с увеличенным временем работы  $\tau=270$  с, двухрядный шарикоподшипник собственного производства был заменен на стандартный однорядный упорно-радиальный шарикоподшипник минимальных габаритов. Для защиты полости подшипника от воздействия внешней среды была установлена пылевлагозащитная резиновая манжета.

Для этого сопла вместо экрана из пресс-материала П5-2, устанавливаемого снаружи раструба (сплав ВН-2АЭ), был разработан экран, состоящий из двух тонкостенных титановых ОТ4 оболочек, между которыми устанавливалось несколько слоев экранно-вакуумной теплоизоляции. Это решение позволило снизить массу подвижной части и ее момент инерции.

ВУС такой конструкции в составе соплового блока были успешно испытаны как автономно на модельном газогенераторе с пастообразным топливом, так и в составе штатного твердотопливного двигателя 15Д221 на этапах конструкторских, доводочных, летных и межведомственных испытаний и сданы в серийное производство.

Дальнейшим совершенствованием органов управления двигателями верхних ступеней была разработка РДТТ 15Д191, выполненного по тянущей схеме.

Четырехсопловой блок, соединенный с камерой сгорания посредством газоходов, содержал управляющие сопла с регулируемы критическими сечениями (максимальная площадь  $2,08 \text{ см}^2$ ), благодаря чему путем перераспределения расхода обеспечивалось управляющее усилие до 40 % тяги двигателя.

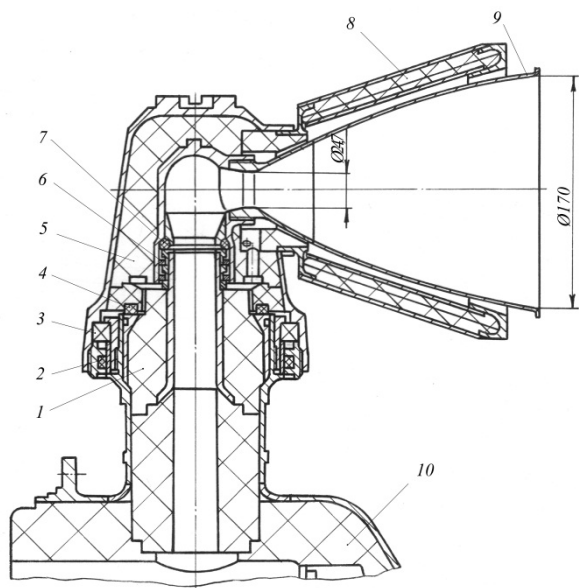


Рис. 3. Вращающееся управляющее сопло двигателя 15Д221:

- 1 – неподвижная часть; 2 – сальник; 3 – подшипник;  
4 – защитное кольцо; 5 – подвижная часть;  
6 – уплотнение; 7 – фильтр; 8 – теплоизоляция  
раструба; 9 – раструб; 10 – газосборник

Конструкция состоит из стационарного сопла (рис. 4), расположенного в сферическом корпусе с вкладышем-седлом, и клапана, состоящего из заслонки поступательного типа, совершающей перемещения внутри корпуса. Материалами седла, заслонки и корпуса клапана является ниобиевый сплав ВН-2АЭ, направляющая клапана изготовлена из углеситалла УСБ-15. Внутренней теплозащитой служит пресс-материал П5-2, корпус регулируемого сопла – титановые сплавы ОТ4 и ОТ4-0.

В донной части заслонки выполнены отверстия для компенсации газодинамической силы, действующей на шток клапана.

Три огневых стендовых испытания показали принципиальную возможность создания двигателей с такими управляющими соплами.

Дальнейшее совершенствование вращающегося управляющего сопла заключалось в его выполнении по "горячей" схеме. Подвижная часть не содержала теплозащитных материалов, а в неподвижной был использован пресс-материал П5-2 только в области фланца установки сопла в двигатель. В варианте установки сопла на газотеплозащита отсутствует.

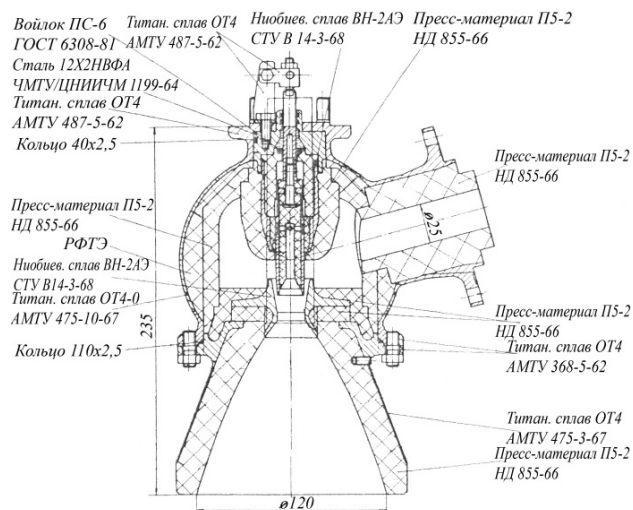


Рис. 4. Конструкция управляющего сопла двигателя 15Д191

Конструкция сопла и двигателя представлена на рис. 5.

Сопло состоит из цилиндрической неподвижной части с овальными отверстиями, выполненными в боковой стенке цилиндра, через которые горячий газ поступает в подвижную часть, подвеской для которой служат два подшипника скольжения, симметрично расположенные относительно оси сопла (ось сопла перпендикулярна оси неподвижной части), уплотнениями – двумя разрезными уплотнительными кольцами. Подшипники и кольца изготовлены из углеситалла УСБ-15, в зазоре перед уплотнениями установлены фильтры из вольфрамовой сетки.

В усовершенствовании конструкции ВУС и малогабаритных клапанных устройств большую роль сыграло применение углеродного материала углеситалла УСБ-15. Успешное применение этого материала в таких деталях, как втулки подшипников скольжения и разрезные уплотнительные кольца, обеспечивается наличием комплекса следующих уникальных свойств:

- низкий коэффициент трения;
- химическая и эрозионная стойкость в среде продуктов сгорания;
- газонепроницаемость;
- высокая прочность;
- изотропность свойств;
- мелкозернистое строение;

– сохранение упругости в течение всего времени работы двигателя и даже после работы;

– удовлетворительная обрабатываемость, позволяющая получать детали с погрешностями Н7-S6 и малой шероховатостью ( $R_{z0,63}$ ) (визуально поверхности выглядят зеркальными).

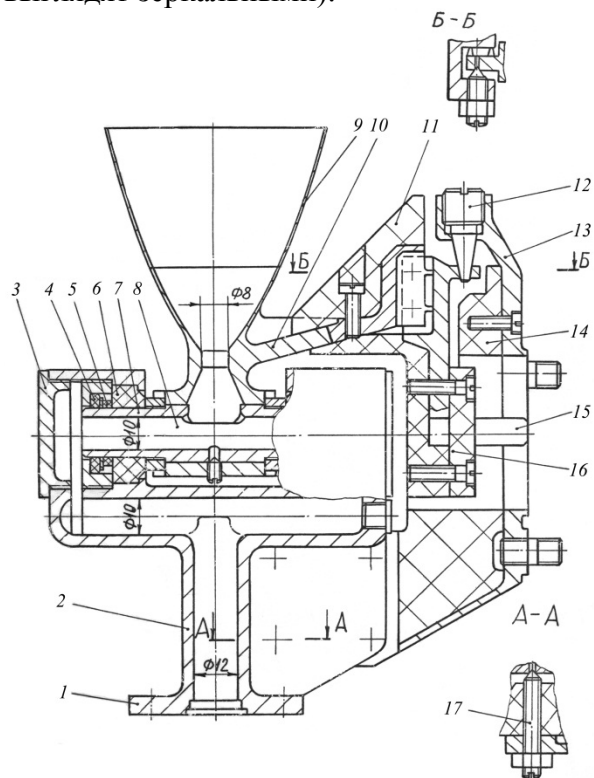


Рис. 5. ВУС, выполненное по "горячей" схеме: 1 – фланец; 2 – неподвижная часть; 3 – крышка; 4 – фильтр; 5 – уплотнение; 6 – подшипник; 7 – подвижный вал; 8 – канал вала; 9 – раструб; 10 – рычаг; 11, 14, 16 – теплозащита; 12 – винт; 13 – кронштейн; 15 – водило; 17 – стопор

Экспериментальные исследования опытной конструкции подтвердили возможность снижения шарнирного момента и массы ( $D_{кр}=24,7$  мм, масса ВУС – 3,7 кг, суммарный шарнирный момент – 1,5 кгс·м), улучшения технологичности и упрощения отработки новой конструкции в сравнении с ранее рассмотренными вращающимися управляющими соплами твердотопливного двигателя.

На рис. 6 показана конструктивная схема ВУС для управления вектором тяги в двух плоскостях.

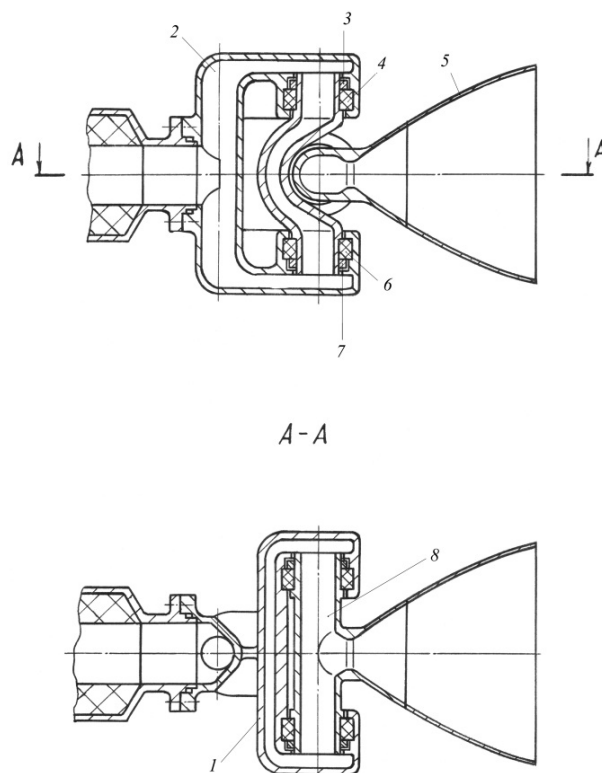


Рис. 6. ВУС для управления в двух плоскостях: 1 – подвижная часть; 2 – неподвижная часть; 3, 7 – уплотнение; 4, 6 – подшипник; 5 – раструб; 8 – подвижный вал

В результате дальнейших работ по уменьшению потребной мощности рулевых приводов были разработаны клапаны перепуска горячего газа с малым углом вращения вала для работы в релейном режиме и проведены их экспериментальные исследования. Клапаны (большой и малый), приведенные на рис. 7 и 8, выполненные по "горячей" схеме, не содержали теплозащиты. Материалом их корпусов и деталей был выбран сплав ВН-2АЭ, для валов и заслонок – молибденовый сплав ВМ-2, опоры скольжения и уплотнения – из углеситалла УСБ-15. Из-за сложной конструкции клапаны, требующие минимальных погрешностей при изготовлении седел, заслонок, опор и уплотнений, были изготовлены в цехе производства клапанов ПО ЮМЗ.

Большую помощь в организации размещения изготовления ОК ВУС и клапанов в лучших цехах ПО ЮМЗ оказал А.А. Макаров.

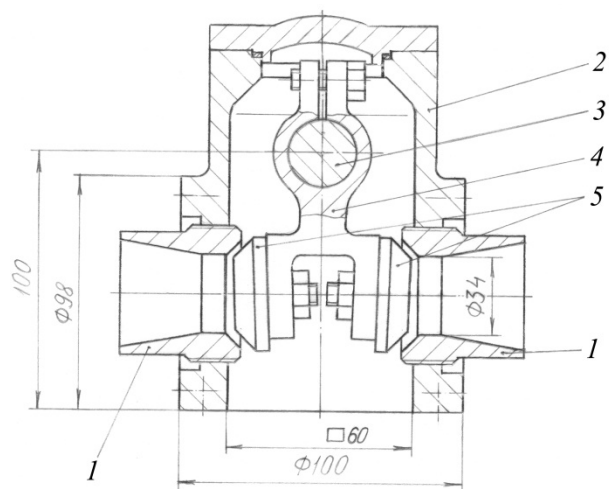


Рис. 7. Большой клапан:

- 1 – седло-раструб; 2 – неподвижный корпус;  
3 – вал; 4 – рычаг; 5 – заслонка

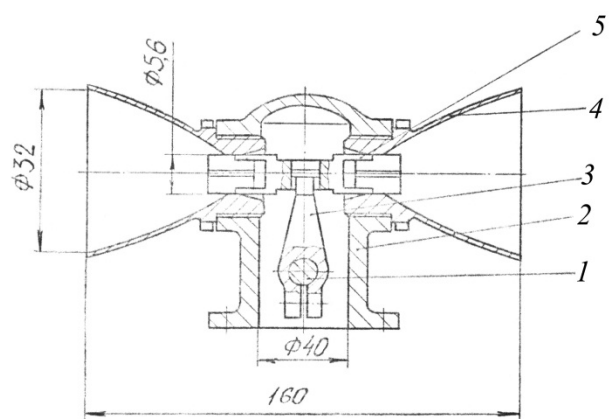


Рис. 8. Малый клапан:

- 1 – вал; 2 – неподвижный корпус; 3 – рычаг;  
4 – раструб; 5 – заслонка с направляющей

Клапаны были испытаны на опытных двигателях, ранее разработанных для вышерассмотренных ВУС. В ходе испытаний подтверждены работоспособность и низкий уровень шарнирных моментов клапанов, удовлетворительная стойкость всех их элементов, отсутствие эрозионного уноса материалов, герметичность конструкции и уплотнительных элементов подвижных соединений, приемлемый уровень шарнирных моментов.

В конце 60-х–начале 70-х годов нами проводились работы на перспективу по созданию малогабаритных газодинамических клапанов со встроенным в конструкцию электромагнитным приводом. Положительные результаты этих работ были утверждены главным конструктором КБ-5 В.И. Кукушкиным, а затем получено авторское свидетельство № 52192 от 08.06.70 г.,

выданное Комитетом по делам изобретений и открытий. Конструкция клапана представлена на рис. 9.

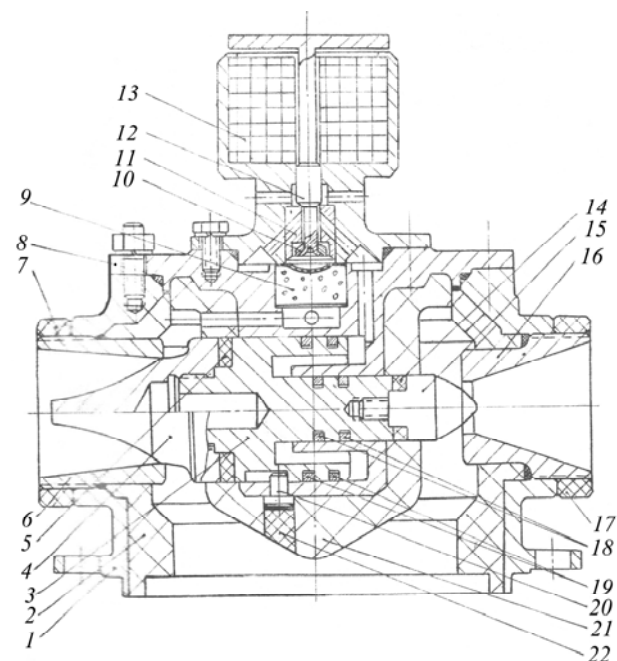


Рис. 9. Газодинамический клапан двухстороннего действия для перепуска горячих газов:

- 1 – корпус; 2 – теплозащита; 3 – поршень;  
4, 15 – конусы; 5, 14 – кольца теплозащитные;  
6, 16 – сопла; 7, 17 – контргайки; 8 – крышка клапана;  
9 – фильтр-охладитель; 10 – головка;  
11 – седло; 12 – шток; 13 – электромагнит (привод);  
18, 19 – кольца уплотнительные; 20 – ограничитель хода; 21 – теплозащита; 22 – пробка

В настоящее время эта конструкция может быть рекомендована для применения во вновь разрабатываемых двигателях ТТ в качестве органа управления вектором тяги.

Одной из актуальных задач, стоящих при разработке РДТТ, является герметизация внутренней полости в зоне установки сопловой заглушки.

Известно, что заглушки, клеиваемые до критического сечения, в критическом сечении или за критическим сечением с опорой на пористые материалы (графит или пластик), фактически не герметизируют внутреннюю полость РДТТ. И даже заглушки, клеиваемые в критическом сечении с опорой на облицовки из жаростойких материалов, также не обеспечивают герметизацию, так как между облицовкой и металлическим корпусом имеется пакет, например из пористых графита В-1 и теплоизоляции П5-2. Поэтому начиная с 60–70-х гг. пред-

приятие получало замечания представителей Заказчика о невыполнении требований ТЗ по обеспечению герметичности РДТТ.

В связи с этим была разработана и внедрена заглушка (рис. 10) из алюминиевого сплава, стенка которой располагалась в зазоре между вкладышем критического сечения и выходным конусом с опорой непосредственно на опорный бурт металлического корпуса силовой конструкции в области вкладыша. Герметизация стыка опорного бурта и соответствующей опорной поверхности заглушки осуществлялась резиновым кольцевым уплотнением, устанавливаемым в канавку. Таким образом, во-первых, внутренняя полость РДТТ надежно герметизируется, во-вторых, не нагружаются неметаллические материалы вкладыша, выходного конуса или раструба и их клеевые швы.

На этапе выпуска КД на новые конструкции ВУС и начала их производства большую работу провел Л.И. Цепур.

При проектировании всех конструкций ВУС и клапанов большой вклад внес Б.А. Алтухов, особенно при выполнении расчетов, подготовке и проведении испытаний и анализе результатов.

Статья поступила 01.12.2015

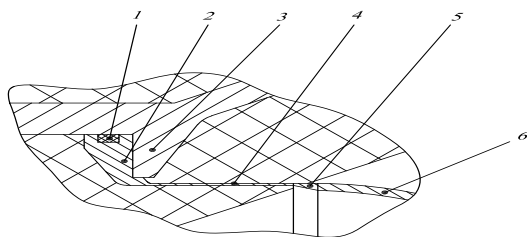


Рис. 10. Заглушка:

- 1 – уплотнение; 2 – бурт заглушки;
- 3 – опорный бурт корпуса; 4 – обечайка заглушки;
- 5 – канавка опасного сечения; 6 – заглушка

Проведенные ОСИ таких заглушек в соплах показали их работоспособность.

В заключение необходимо отметить, что весомый вклад и помощь в разработке проекта ОК маломоментного ВУС, выполненного по "горячей" схеме, несмотря на занятость работой по большим соплам и системе вдува, оказал Н.С. Голубенко. Чертежи ОК первого такого сопла в кратчайшие сроки были выполнены при участии Н.В. Матеты и помощи тогда еще молодых специалистов В.А. Цыганова и И.П. Мартыненко.