

УДК 621.464.3.054

Канд. техн. наук Н.С. Голубенко, Б.И. Кушнир, В.А. Зензеров

ОПЫТ ОТРАБОТКИ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРОМ ТЯГИ РДТТ

Изложены конструктивные особенности и основные характеристики органов управления вектором тяги маршевых РДТТ, созданных в КБ-5 ГП "КБ "Южное" начиная с 1966 года. Рассмотрены основные конструкторские и расчетно-теоретические задачи, решенные при их создании.

Викладено конструктивні особливості й основні характеристики органів керування вектором тяги маршових РДТТ, створених у КБ-5 ДП "КБ "Південне" починаючи з 1966 року. Розглянуто основні конструкторські й розрахунково-теоретичні завдання, вирішені під час їх створення.

The design peculiarities and basic characteristics of thrust vector controls of main SRM developed by Yuzhnoye SDO DO-5 beginning from 1966 are presented. The basic design and design-theoretical problems solved during thrust vector controls development are considered.

В общем объеме научно-технических задач, решаемых при создании маршевых РДТТ, вопросы разработки органов управления вектором тяги занимают по сложности одно из первых мест.

Начиная с 1966 г. коллективом КБ-5 были созданы органы управления самого различного класса, превосходящие по своим параметрам зарубежные образцы, а в некоторых случаях – уникальные, не имеющие аналогов в мировой практике.

Орган управления (ОУ) вектором тяги РДТТ – это устройство, являющееся составной частью сопла, отклоняющее частично или полностью газовый поток двигателя с целью создания боковой управляющей силы. Газовый поток РДТТ имеет температуру 3300–3700 К, содержит конденсированные частицы и оказывает на все элементы сопла мощное тепловое и эрозионное воздействие. Обеспечение в этих условиях работоспособности ОУ и требуемых управляющих сил при минимальных энергетических потерях является чрезвычайно сложной задачей.

Конструкторы ощутили это в полной мере в процессе создания первого маршевого РДТТ – четырехсоплового двигателя 15Д15 (первая ступень комбинированной малогабаритной МБР). По сегодняшним представлениям единичное поворотное управляющее сопло (ПУС) этого двигателя имело относительно небольшие размеры (диаметр критического сечения 162 мм, диаметр выходного сечения 530 мм) и от-

клонялось только в одной плоскости на угол $\pm 7^\circ$. Одновременный поворот в одну сторону двух расположенных в одной плоскости сопел создавал боковую управляющую силу (в плоскости тангажа или рыскания), равную ~6% суммарной тяги двигателя. Для управления по каналу крена сопла, расположенные в одной плоскости, отклонялись в противоположные стороны.

Наиболее сложной задачей, которую предстояло решить при создании ПУС двигателя 15Д15, было обеспечение надежного уплотнения зазора между наружной сферической поверхностью подвижной части сопла и ответной сферической поверхностью неподвижного корпуса. Было найдено новое конструкторское решение – блочное диафрагменное уплотнение, представляющее собой отдельную подборку, содержащую две направленные в противоположные стороны диафрагмы, бурты которых плотно зажимались между стальными кольцами. Полость между диафрагмами заполнялась консистентной смазкой. До установки в сопло эта подборка проверялась на герметичность давлением, превышающим максимальное рабочее в 1,6 раза.

Значительные трудности возникли в связи с обеспечением тепловой защиты уплотнения. В принятой конструкции ПУС уплотняемый зазор располагался в докритической зоне газового тракта, где наряду с полным камерным давлением действовали мощные тепловые потоки, обусловленные сложным несимметричным течением про-

дуктов сгорания при отклонении сопла. Кроме того, указанный зазор изменялся по времени работы двигателя от 3,8 до 6,5 мм из-за деформаций подвески, отслеживающих камерное давление, и тепловых расширений деталей, формирующих зазор. В этих условиях тепловая защита уплотнения была осуществлена также новым конструкторским решением – мягким защитным кольцом, представляющим собой пакет отдельных армированных колец из вольфрамовой сетки и угольной ткани. Для достижения надежной работоспособности мягкого защитного кольца потребовались испытания различных вариантов конструкции с целью получения оптимального сочетания отдельных его элементов.

Блочное диафрагменное уплотнение в сочетании с мягким защитным кольцом следует отнести к удачным конструкторским решениям. За весь период отработки (испытано около 400 сопел) не было ни одного случая нарушения работоспособности ПУС, связанного с негерметичностью уплотнения. Кроме этого, созданная конструкция ПУС обеспечивала минимальный момент сопротивления при отклонении сопла (шарнирный момент) – не более 900 Н·м. В зарубежном аналоге – поворотном сопле двигателя первой ступени ракеты "Минитмен-1" (США), имеющем примерно такие же габариты и угол качания, шарнирный момент достигал 3000 Н·м. Американские конструкторы решали задачу уплотнения и его тепловой защиты при помощи резинового кольца круглого сечения, установленного в сферическом зазоре между подвижной и неподвижной частями сопла, и жесткого кольца, «соскребающего» со сферической поверхности подвижной части сопла твердые частицы продуктов сгорания топлива и кокса теплозащитных покрытий.

Дальнейшее совершенствование маршевых РДТТ обусловило переход от четырех сопловых к односопловым блокам. Применительно к односопловой схеме РДТТ в КБ-5 была разработана опытная конструкция центрального ПУС в карданной подвеске. При разработке этой конструкции были сохранены основные решения одно-

осного ПУС по типу подвески, уплотнения и тепловой защиты уплотнения.

Сопло прошло отработку в составе опытной двигательной установки с расходно-тяговыми характеристиками, близкими к полученным на двигателе 15Д15. Были проведены 33 испытания, обеспечены работоспособность конструкции и относительно небольшой для ПУС таких габаритов шарнирный момент – 4000 Н·м при угле качания $\pm 3^\circ$.

Однако наличие карданного кольца с одновременным увеличением (по сравнению с ранее отработанным ПУС) габаритов привело к существенному увеличению осевой деформативности конструкции и снижению до недопустимого для системы управления твердотопливных ракет уровня резонансной частоты системы "рулевой привод – ПУС". Был сделан вывод, что для крупногабаритных РДТТ с увеличенными секундным расходом и давлением в камере сгорания механические подвески ПУС с сосредоточенными реакциями неприемлемы из-за низкой жесткости.

Для устранения этого недостатка требовались подвески с круговым распределением осевой нагрузки.

Результатом работ в этом направлении явилось создание опытной конструкции крупногабаритного ПУС на сферической опоре скольжения. В ней были применены антифрикционные покрытия опорных элементов неподвижной части, обеспечившие в паре с полированной стальной сферической поверхностью подвижной части низкий коэффициент трения 0,02...0,025 при удельном контактом давлении 24 МПа. Во время испытаний сопло отклонялось на угол $3,5^\circ$, давление в камере сгорания двигателя равнялось 6,4 МПа. При этом оно имело значительно большую по сравнению с соплом в карданной подвеске осевую жесткость. Шарнирный момент не превышал 12000 Н·м, основной составляющей шарнирного момента был момент трения.

Анализ результатов испытаний опытной конструкции ПУС на сферической опоре скольжения позволил сделать вывод, что для штатного маршевого двигателя с рабочим давлением 10 МПа и диаметром кри-

тического сечения 500 мм возможно создание ПУС такого типа со следующими характеристиками:

- угол качания $\pm 7^\circ$;
- масса конструкции 1500 кг;
- шарнирный момент 15000 Н·м, в том числе момент трения 12000 Н·м.

При относительной простоте и высокой жесткости конструкции ПУС на сферической опоре скольжения имела существенный недостаток – большую составляющую шарнирного момента трения, что снижает чувствительность автомата стабилизации ракеты.

В середине 60-х годов стал известен принципиально новый тип подвески ПУС, выполняющий одновременно роль уплотнения, – эластичный опорный шарнир (ЭОШ). Он сразу же привлек внимание разработчиков маршевых РДТТ своей простотой и хорошей компоновкой, однако его применение в отечественных разработках долгие годы сдерживало отсутствие низкомодульных резин. Известные в те годы марки резин имели модуль сдвига $(7...9) \cdot 10^5$ Н/м², при котором поворотное сопло с ЭОШ имело шарнирный момент, в 2-3 раза превышающий шарнирный момент других типов ПУС.

В конце 70-х годов появились отечественные рецептуры низкомодульных резин на основе синтетического изопренового каучука с модулем сдвига $(2...3) \cdot 10^5$ Н/м², что вновь вызвало интерес разработчиков ПУС к этому типу подвески.

ЭОШ представляет собой пакет сферических, концентрических, прочно скрепленных друг с другом, чередующихся слоев резины и жестких армирующих тарелей. Общий центр сферических поверхностей всех слоев резины и тарелей лежит на продольной оси сопла и является центром поворота ПУС. Поворот сопла происходит за счет деформаций сдвига слоев резины.

При внешней простоте ЭОШ оказался сложным узлом, потребовавшим серьезных теоретических и экспериментальных исследований.

В 1977 г. КБ "Южное" совместно с КБ "Арсенал" (Санкт-Петербург) разработало первую опытную конструкцию ПУС с

ЭОШ с диаметром критического сечения 328 мм, а в 1980 г. – более совершенный экспериментальный узел с диаметром критического сечения 500 мм. Обе конструкции прошли цеховые и огневые стендовые испытания. Угловая жесткость ЭОШ, полученная при испытаниях опытных конструкций, значительно превышала приемлемые для штатных узлов значения, что явилось результатом незнания критериев проектирования шарнира.

Вместе с тем анализ большого объема экспериментальных данных, полученных при испытаниях опытных конструкций, позволил приблизиться к пониманию методологии проектирования ЭОШ и послужил хорошей основой для дальнейших исследований шарниров.

Были созданы методы проектирования и расчета ЭОШ, позволившие найти оптимальные соотношения геометрических параметров шарнира, обеспечивающие его минимальную угловую жесткость и устойчивость армирующих тарелей в пределах минимальных требуемых запасов. С использованием этих методов в КБ «Южное» были созданы две штатные конструкции ПУС с ЭОШ двигателей первых ступеней МБР. Эти сопла прошли полный объем холодных цеховых и огневых стендовых испытаний. В обеих конструкциях было достигнуто оптимальное сочетание минимальной угловой жесткости и минимального достаточного запаса устойчивости тарелей.

Характеристики испытанных и отработанных в КБ "Южное" эластичных опорных шарниров приведены в таблице. Здесь же для сравнения приведены характеристики ЭОШ ПУС первой ступени американской ракеты МХ. Если привести сравниваемые шарниры к одним условиям (по радиусу первого слоя резины, рабочему давлению и углу качания сопла), то ЭОШ разработки КБ «Южное» будет иметь угловую жесткость на 20...25% меньше, чем американский аналог.

Характеристика	Опытный ЭОШ	Первый штатный ЭОШ КБ-5	Второй штатный ЭОШ КБ-5	ЭОШ ПУС первой ступени МХ
Радиус первого слоя, мм	476	468	370	515
Угловая жесткость, Н·м/град	18000	8000	3500	12000
Приведенная угловая жесткость, Н·м/град	16900	8000	7000	8900

Следует отметить большую роль в создании высокоэффективных эластичных опорных шарниров Днепропетровского филиала НИИ резиновой промышленности (сейчас УНИКТИ ДИНТЭМ). Этим институтом были разработаны рецептура низкомолекулярной резины, технология прессования шарнира и методы контроля качества изготовления.

Правильный выбор методов проектирования и оптимизации параметров ЭОШ, разработка эффективных рецептов резины, технологии прессования и всесторонний контроль качества изготовления ЭОШ обеспечили минимальный шарнирный момент и безаварийную работу шарниров при всех огневых стендовых и летных испытаниях.

В 1973 г. перед коллективом КБ "Южное" была поставлена задача создания маршевого РДТТ первой ступени (индекс ЗД65) ракеты ЗМ65 морского базирования. Высокая плотность компоновки хвостового отсека первой ступени, обусловленная предельно ограниченными объемами размещения МБР на подводной лодке, не позволила применить в этом двигателе в качестве органа управления поворотное управляющее сопло. Необходим был орган управления на базе стационарного сопла. К этому времени в КБ "Южное" были проведены проектные работы и экспериментальные исследования по управлению вектором тяги при помощи безгазоходного вдува горячего камерного газа в закритическую часть сопла. Аналогичной по физическому принципу системой в это же время занимался Московский институт теплотехники, однако в его маршевые РДТТ вдувался не камерный газ, а более холодные и не содержащие твердых частиц двуокиси алюминия продукты сгорания топлива. Это облегчало решение глав-

ной задачи системы вдува – обеспечение работоспособности клапанов, регулирующих расход вдуваемого газа и соответственно значение боковой управляющей силы, однако существенно снижало эффективность системы из-за более низкой по сравнению с основным потоком температуры вдуваемого газа.

Исходя из жестких компоновочных ограничений, базируясь на собственном опыте и учитывая недостатки "холодного" вдува, КБ "Южное" приняло в качестве основного варианта органа управления для двигателя ЗД65 систему безгазоходного вдува горячего камерного газа.

Принимая такое решение, инженеры КБ "Южное" хорошо осознавали, насколько сложной задачей является создание работоспособной системы "горячего" вдува, особенно главного его элемента – клапана. Условия работы клапана чрезвычайно тяжелые: давление в камере сгорания двигателя – 6,5...10 МПа, температура продуктов сгорания топлива – 3600 К. Наиболее термостойкие конструкционные материалы на основе вольфрама, из которых можно изготовить силовые детали клапана, работают в этих условиях на пределе своих возможностей (температура плавления вольфрама – 3653 К). Кроме того, продукты сгорания твердого топлива в пограничном слое перед входом в зону клапана насыщаются твердыми частицами, уносимыми с внутренних теплозащитных покрытий двигателя. Эти частицы содержат углерод, который, вступая в химическое взаимодействие с вольфрамом деталей клапана, образует эвтектические соединения, температура плавления которых значительно ниже температуры плавления чистого вольфрама. Но самым главным препятствием, которое предстояло преодолеть, были высокие термические напряжения в материале деталей клапана в начальный момент работы двигателя, когда при запуске двигателя на холодный клапан обрушиваются мощные тепловые потоки от продуктов сгорания топлива.

Мало кто верил в успешное решение этой задачи. Это неверие подкреплялось также информацией о том, что разработчики маршевых РДТТ баллистических ракет

США, проведя экспериментальные работы по системе "горячего" вдува, пришли к твердому убеждению, что доведение ее до требуемого уровня работоспособности невозможно.

Система вдува содержит восемь клапанов, определенное расположение которых обеспечивает управление вектором тяги по всем каналам стабилизации (тангаж, рыскание, крен). В каналах тангажа и рыскания система обеспечивала боковую управляющую силу до 6% суммарной тяги двигателя, а управляющий момент в канале крена – 12000 Н·м. Клапан был выполнен по возвратно-поступательной схеме. Основные рабочие элементы клапана (заслонка и седло) были выполнены из вольфрамосодержащего псевдосплава ВНС-1. Учитывая то, что этот материал в отмеченных выше условиях работает на пределе своих возможностей, между заслонкой и седлом клапана в его закрытом положении был оставлен так называемый нулевой зазор. Отсутствие такого зазора могло привести к разрушению или свариванию заслонки и седла при закрытии клапана. Травление камерного газа через нулевой зазор приводит к дополнительным потерям тяги двигателя, поэтому одной из задач отработки системы вдува было обеспечение минимального нулевого зазора. Для этого корпус сопла был спроектирован из соображений его максимальной жесткости в местах установки клапанов. Жесткость корпуса, а также тепловые расширения деталей клапана были тщательно просчитаны, а результаты расчетов проверены экспериментально. С учетом всех факторов начальное значение нулевого зазора было выбрано равным 0,5 мм.

Решение главной задачи – обеспечение работоспособности клапанной группы – велось в следующих направлениях:

- исследование параметров газовых потоков и теплообмена всех элементов узла вдува в зависимости от режима работы РДТТ и программы функционирования клапанов;
- исследование термонапряженного состояния элементов клапанной группы;
- поиск конструкторских решений, обеспечивающих термическую стойкость

деталей клапана (главным образом заслонки) в условиях действующих тепловых потоков и нагрузок;

- анализ влияния исходного сырья и характеристик материала на работоспособность деталей клапана.

Кроме этого решалась задача обеспечения минимальных усилий на штоке клапана с целью уменьшения массы рулевого привода и бортового источника мощности. Были предложены и исследованы экспериментально несколько типов компенсаторов газодинамической силы, действующей на заслонку: телескопический, диафрагменный и газодинамический. Последний, как наиболее эффективный, был принят для штатного варианта конструкции клапана.

Больше всего сил, энергии и времени было потрачено на поиск термически стойкой конструкции заслонки клапана вдува. Экспериментальному исследованию и расчетам на термопрочность были подвергнуты различные варианты заслонок из вольфрамового псевдосплава: цельная, полая, составная с радиусными буртами, составная цилиндрическая.

Первоначально испытанные цельные заслонки оказались неработоспособными. Большие начальные градиенты температуры в этой конструкции приводили к недопустимо большим термическим напряжениям, появлению трещин, сколов и разрушению заслонок. Переход от цельной заслонки к полый снизил напряжения, но этого оказалось недостаточно. Частота отказов полых заслонок стала меньшей, однако разрушения продолжались. Можно было уменьшить толщину стенки полый заслонки до такой величины, при которой термические напряжения в материале заслонки становятся меньше допустимых, и исключить образование трещин, но в этом случае конструкция становится недостаточно прочной и не выдерживает газодинамических нагрузок.

Существенное увеличение термической стойкости было достигнуто в составном варианте конструкции заслонки, внутренний силовой элемент которой защищен снаружи тонкостенной втулкой. Окончательная работоспособность этого варианта

была достигнута после теоретических и экспериментальных поисков оптимальных толщин и радиусов деталей заслонки и зазоров между ними, обеспечивших термическую стойкость наружных тонкостенных элементов, прочность внутреннего силового элемента и их совместную работоспособность.

В результате расчетно-теоретических и проектно-экспериментальных работ, испытаний и тщательного анализа большого количества вариантов конструкции была создана работоспособная конструкция клапана и газодинамическая система управления вектором тяги маршевого РДТТ. Двигатель 3Д65, а затем и его аналог – двигатель 15Д206 с системой вдува горячего камерного газа – были полностью отработаны и приняты в составе соответствующих МБР на вооружение. До сегодняшнего дня система управления вектором тяги маршевых РДТТ при помощи безгазоходного вдува горячего камерного газа в закритическую часть сопла является уникальной и не имеет аналогов в мировой практике.

Параллельно с рассмотренными выше задачами, связанными с созданием органов управления вектором тяги, были решены сложные задачи обеспечения общей работоспособности сопловых блоков и отдельных его элементов. Наибольшие трудности возникли при отработке вкладыша критического сечения. В результате теоретических и экспериментальных исследований различных вариантов конструкций были созданы неразгораемые вкладыши с облицовкой из псевдосплава на основе вольфрама и разгораемые вкладыши из углерод-углеродных материалов. Для маршевых РДТТ вторых ступеней были созданы сопловые блоки с углерод-углеродными раздвижными раструбами, позволяющие уменьшить начальную длину и массу ракеты.

Таким образом, коллективом КБ-5 ГП "КБ "Южное" начиная с 1966 г. были созданы несколько типов поворотных управляющих сопел и уникальная газодинамическая система управления вектором тяги. Успех в разработке органов управления был обеспечен в первую очередь высокой творческой активностью работников КБ-5, воплотивших в созданные конструкции новые эффективные конструкторские решения, защищенные большим количеством авторских свидетельств, а также эффективные конструкционные эрозионно-стойкие и теплозащитные материалы и технологии изготовления из них деталей сопловых блоков и органов управления, созданные отраслевыми институтами: ИПМ АНУ, НИИГрафит, ЦНИИМВ, ХФТИ – при активном творческом участии специалистов комплекса материалов и передовых технологий ГП "КБ "Южное". Большую роль в создании совершенных органов управления сыграли работы, выполненные ведущими специалистами расчетно-теоретических отделов ГП "КБ "Южное".

Статья поступила 20.12.2015