

УДК 629.7.062.2

А. А. Макаренко, А. Н. Машенко, Е. П. Назаренко, В. В. Скочко, В. В. Устич, Е. И. Шевцов

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВНОГО КЛАПАНА С ПНЕВМОПРИВОДОМ И ГИДРОТОРМОЗОМ ДЛЯ РАБОТЫ В КРИОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Для обеспечения запуска двигателя основной конструкции первой ступени РН «Тaurus» разработан разделительный клапан окислителя, обеспечивающий минимальное гидравлическое сопротивление, время открытия и величину гидроудара. Рассмотрены конструкция клапана, основные этапы его наземной экспериментальной отработки и основные замечания к конструкции, выявленные в процессе изготовления и отработки.

Для забезпечення запуску двигуна основної конструкції першого ступеня РН "Тaurus" розроблено роздільний клапан окиснювача, який забезпечує мінімальні гідравлічний опір, час відкриття та величину гідроудару. Розглянуто конструкцію клапана, основні етапи його наземного експериментального відпрацювання й основні зауваження до конструкції, виявлені у ході виготовлення та відпрацювання.

To support ignition of Taurus LV first stage core structure engine, an oxidizer dividing valve has been developed that ensures minimal hydraulic resistance, opening time and hydraulic impact. The paper considers the valve design, main phases of its ground development testing and basic critical comments on the design made in the process of manufacturing and testing.

На изделиях разработки ГП «КБ «Южное» разделительные клапаны применялись только на линии подачи горючего. При проектировании опытной конструкции первой ступени РН «Тaurus» возникла необходимость разработки крупногабаритного разделительного клапана окислителя (рис.1).

Наряду со стандартными требованиями, такими как обеспечение минимальных массы и гидравлического сопротивления, требуемого времени открытия (закрытия), заданного ресурса, к клапану предъявлялись специальные требования:

- обеспечение минимального давления гидроудара;
- обеспечение герметичности уплотнений и посадки затвора на седло в широком диапазоне давления и температуры рабочей среды;
- обеспечение открытого положения затвора клапана в полете даже в случае разгерметизации магистрали подачи управляющего давления;
- размещение клапана в зоне, крайне ограниченной интерфейсами расходной магистрали РН с одной стороны и двигательной установки – с другой.



Рис. 1. Разделительный клапан окислителя

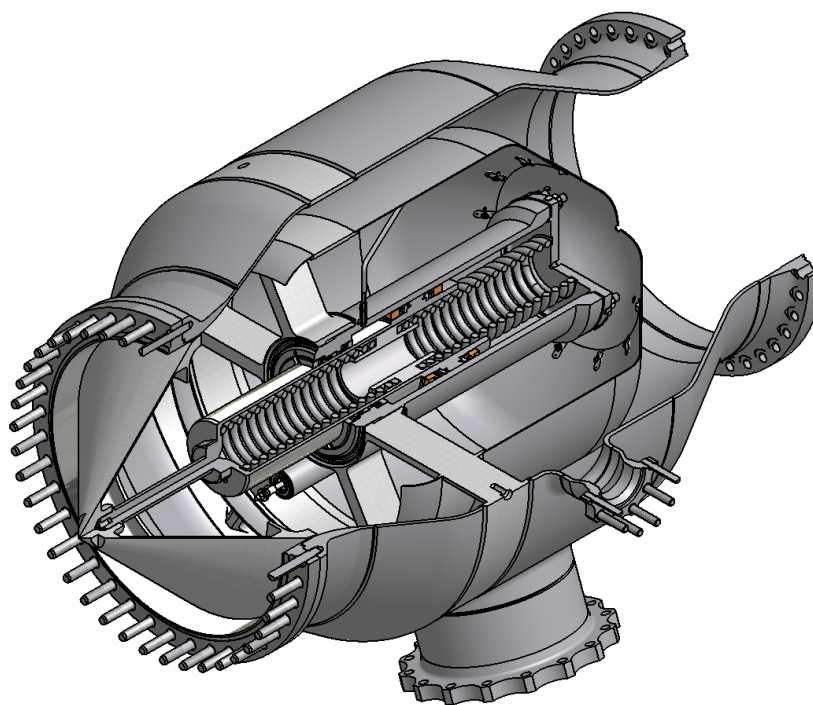


Рис. 2. Общий вид разделительного клапана окислителя

Конструкция клапана. Общий вид клапана показан на рис. 2.

Разработанный клапан имеет диаметр проходного сечения 400 мм, массу – 196 кг. Большая масса клапана обусловлена требованием обеспечить коэффициент запаса прочности корпуса клапана 2,5 и применением стали для изготовления основных узлов клапана. Применение стали вызвано требованиями технологичности и сжатыми сроками освоения изготовления клапана. Изготовление основных узлов клапана из алюминиевых сплавов требовало проведения отработки технологических процессов штамповки и сварки.

Для обеспечения герметичности посадки затвора на седло в широком диапазоне температур и давлений в клапане была применена конструкция уплотнения металл по металлу с тонким деформируемым буртом. Упругий шток, выполненный заодно с поршнем пневмогидропривода и жестко соединенный с затвором при помощи резьбового соединения, обеспечивает компенсацию несоосности затвора и седла.

Специально рассчитанная конфигурация проточной части, образованная корпусом, обтекателем и затвором, обеспечивает минимальный коэффициент гидравлического сопротивления – 0,7. Для удержания затвора клапана в открытом положении при сбросе управляющего давления на откры-

тие применяется специальный блок управления, в состав которого входит пневмозащелка, обеспечивающая запирание давления в управляющей полости клапана.

Для регулирования времени движения затвора в процессе открытия клапана были применены:

- жиклеры в магистрали управляющего давления и золотник в блоке управления, обеспечивающие дополнительное сопротивление и уменьшение скорости набора давления в рабочей камере;
- в линии подачи управляющего давления специальный накопитель – ресивер;
- пружины, противодействующие усилию поднятия затвора.

Однако этих мер оказалось недостаточно.

Сложность регулирования процесса открытия затвора клапана обуславливалась широким диапазоном условий его работы. При открытии клапана определяющим силовым воздействием является перепад давления на затворе, представляющий разность между давлением жидкого кислорода в баке, прижимающим затвор к седлу, и давлением в магистрали под затвором со стороны ДУ. Значение перепада давления на момент открытия клапана может составлять от 0 до 5 кгс/см², что соответствует прижимающему усилию от 0 до 6,28 тс.

С учетом этого движение затвора клапана начинается при достижении давления в управляющей полости пневмопривода от 3 до 113 кгс/см². По мере поднятия затвора и открытия щели жидкий кислород из объема над затвором начинает перетекать в объем под затвором, при этом перепад давления на затворе уменьшается как за счет повышения давления под затвором, так и за счет снижения давления в движущемся потоке. Это приводит к уменьшению сил, препятствующих движению поршня пневмопривода, увеличению ускорения и соответственно скорости его движения.

Для увеличения времени открытия клапана и уменьшения скорости движения затвора клапана в конструкцию пневмопривода был введен гидравлический тормоз, использующий в качестве рабочей среды жидкий кислород непосредственно из расходной магистрали.

За счет гидравлического торможения при довольно большом разбросе управляющего давления, при котором начинается открытие клапана (более чем в 30 раз), скорость движения затвора находится в узком диапазоне от 0,06 до 0,1 м/с, а минимальное время открытия составляет 1,8 с. При отсутствии гидравлического торможения диапазон скоростей движения затвора возрастает на порядок – от 0,1 до 5 м/с, а минимальное время открытия уменьшается до 0,1 с.

Наземная экспериментальная отработка. Как было сказано выше, функционирование разделительного клапана происходит в среде жидкого кислорода. Прямой эксперимент по срабатыванию клапана в реальных условиях крайне трудоемок и требует больших материальных затрат. Для отработки процесса открытия и закрытия разделительного клапана была разработана специальная схема испытаний в несколько этапов:

– отработка пневмопривода открытия клапана и гидравлического тормоза в условиях нормальной температуры, в качестве рабочего тела в клапане применялась вода. Испытания позволили определить силы сопротивления, возникающие при движении поршня привода, коэффициент гидравлического сопротивления отверстий в крышке и поршне пневмопривода, уточнить методики расчета динамики открытия клапана. Всего было проведено 180 испытаний [1];

– отработка разделительного клапана на жидком азоте. Испытания позволили провести отработку всех элементов клапана в криогенных условиях, соответствующих штатным, в том числе отработку ресурса до 300 срабатываний. Всего было проведено более 360 испытаний [2];

– отработка разделительного клапана на жидком кислороде (рис. 3). Испытания позволили подтвердить параметры работы клапана в условиях, максимально близких к штатным. Было проведено 10 испытаний [2].



Рис. 3. Клапан при испытаниях на жидком кислороде

Ввиду плотной компоновки разделительного клапана с тройником расходной магистрали его гидравлические характеристики определялись в составе тракта питания окислителем на этапе отработки, которая проводилась на полномасштабной опытной конструкции, включающей в себя

нижнее днище бака и расходную магистраль с разделительным клапаном. В качестве модельной жидкости использовали воду. Фотография разделительного клапана в составе расходной магистрали приведена на рис. 4.



Рис. 4. Разделительный клапан с фрагментом расходной магистрали

Технические возможности стендовой базы позволили смоделировать режимы течения в области автомодельности.

Результаты гидравлического расчета и проливов разделительного клапана с тройником приведены в таблице.

| Метод определения гидравлических характеристик | Коэффициент гидравлического сопротивления клапана с тройником, приведенный к диаметру проточной части клапана (400 мм) |
|--|--|
| ANSYS CFX | 2,69 |
| Эксперимент | 2,16 |

Результаты летных испытаний. Хорошо спланированная наземная экспериментальная отработка позволила выявить и устранить все слабые места клапана. Эксплуатация клапана в составе РН подтвердила его работоспособность. Были проведены четыре успешных пуска РН, замечаний к функционированию клапана не было.

Опыт разработки и отработки. Первые же испытания пневмопривода в жидком азоте показали, что первоначальная конструкция уплотнений не обеспечивает требуемую герметичность [3]. В ходе детального анализа было установлено, что причиной появления негерметичности при криогенной температуре является падение усилия затяжки фторопластовых манжет из-за температурной деформации уплотнения. Для решения данной проблемы в уплотне-

ния пневмопривода были установлены пакеты тарельчатых пружин (пружин Бельвилля). Установка пакета тарельчатых пружин между каждой манжетой и прижимающей ее гайкой обеспечила практически постоянное усилие, прижимающее манжету к ее посадочному месту (усилие пружин компенсирует относительные температурные деформации уплотнения) и высокую степень герметичности в большом диапазоне температур (от минус 196 до плюс 65°C).

Опыт изготовления пневмопривода большого диаметра показал значительное влияние качества обработки внутренней поверхности цилиндра пневмопривода на герметичность уплотнений [3]. Для обеспечения требуемой герметичности шлифовка поверхности была заменена на алмазное выглаживание.

Вибрационные испытания клапана выявили ненадежность сварных швов, герметизирующих стык между корпусом клапана и корпусом пневмопривода. Для повышения надежности подачи управляющего давления в привод был введен специальный трубопровод.

Из-за нарушения технологии испытаний (не обеспечено требуемое время между срабатываниями клапана) при открытии клапана произошло искривление штока пневмопривода. Неожиданно оказалось, что причиной указанного отказа стало запирающее жидкого кислорода во внутренней полости сигнализатора положения затвора вследствие нештатной скорости перемещения его поршня ввиду несрабатывания гидравлического тормоза. Для устранения вы-

явленного замечания детали сигнализатора были доработаны в части увеличения проходного сечения каналов, через которые жидкий кислород истекал из полости сигнализатора. Выявление причин этого отказа потребовало проведения серии серьезных расчетов, в т.ч. гидродинамических.

Новое поколение клапанов. Опыт разработки разделительного клапана окислителя и использование отработанных методик расчета его параметров позволили в минимально возможные сроки (8-9 месяцев) разработать и отработать разделительный клапан горючего, используемый на I и II ступенях РН «Маяк-СЗ.9» и «Циклон-4М». Фотография разделительного клапана горючего РН «Маяк-СЗ.9» приведена на рис. 5.



Рис. 5. Разделительный клапан горючего

Основные характеристики разработанного клапана: диаметр – 141 мм; масса – 10,5 кг; коэффициент гидравлического сопротивления – 1,23. Хорошие массовые характеристики клапана получены за счет применения в конструкции его корпуса алюминиевых сплавов вместо стали. Коэффициент гидравлического сопротивления больше относительно разделительного клапана окислителя из-за использования другого метода уплотнения затвора.

Все схемные конструктивные решения, заимствованные из конструкции разделительного клапана окислителя, еще раз подтвердили свою работоспособность и надежность во время проведения автономных отработочных испытаний разделительного клапана горючего.

Список использованной литературы

1. Отчет по результатам контрольных испытаний клапана разделительного "Таурус-П.21.17039.203ОТ"/ ГП "КБ "Южное". – Днепропетровск, 2011. – 30 с.
2. Отчет по результатам контрольных испытаний клапана разделительного "Таурус-П.21.17050.203ОТ"/ ГП "КБ "Южное". – Днепропетровск, 2011. – 23 с.
3. Отчет-заключение по результатам доводочных испытаний клапана разделительного "2TRS2S1.94.7204.0000.0000.00.0 ОЗ"/ ГП "КБ "Южное". – Днепропетровск, 2011. – 161 с.

Статья поступила 07.09.2017