

РОССИЙСКИЕ ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА ДЛЯ РАЗГОННЫХ БЛОКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

 **В.И. Морозов, Е.Л. Заславский, Р.Ф. Морозов, Н.Н. Орлов, И.А. Смирнов, А.Г. Яковлев**

Конструкторское бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»
Россия, 141070, Московская обл., г.Королев, ул.Богомолова, д.12.
Тел. (495) 513-4413, факс (495) 516-8001, 513-54-73. E-mail: kbhimmash@korolev-net.ru

В обзоре рассмотрены кислородно-водородные двигатели для разгонных блоков ракет-носителей тяжелого и среднего классов, существенно повышающие экологические характеристики данных ракетных комплексов, а также обеспечивающие максимальную эффективность разгонных блоков, созданные на основе разработанного в КБХиммаш им. А.М. Исаева и используемого в настоящее время в качестве двигателя разгонного блока индийской ракеты GSLV двигателя КВД1. Представлены характеристики и показатели двигателя КВД1, перспективных вариантов его модернизации и модификации, а также двигателей меньших, чем КВД1, размерностей для разгонных блоков ракет-носителей среднего класса, спроектированных на основе агрегатов двигателя КВД1. Дана оценка эффективности использования указанных двигателей в составе кислородно-водородных блоков перспективных ракет-носителей.

LIQUID ROCKET ENGINES OF RUSSIA ON THE ENVIRONMENTAL PURE COMPONENTS OF FUEL FOR THE CRIO STAGES OF ROCKET-BOOSTERS

 **V.I. Morozov, Y.I. Zaslavskiy, R.F. Morozov, N.N. Orlov, I.A. Smirnov, A.G. Yakovlev**

Chemical Machinery Design Bureau, the branch of Khrunichev State Research and Production Space Centre

Oxygen-hydrogen engines, used for heavy and middle class booster upper stages, essential rising up these rocket complexes environmental characteristics and also providing maximal efficiency of upper crio stages are considered.

The oxygen-hydrogen engines are made on the base of KVD1 engine, developed by CMDB, used in the present time as upper stage booster of Indian rocket GSLV.

KVD1 engine characteristics and indexes, perspective versions of its updating and modernization both and little sizes engines as KVD1 for upper stages of middle class boosters, designed on the base of KVD1 engines units are shown.

The efficiency of use above mentioned engines as a path of oxygen-hydrogen stages is qualified.



Морозов Владимир Иванович, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», главный специалист, образование – высшее, профессиональный стаж – 41 год, область научных интересов – ЖРД, криогенная техника, количество публикаций – 7.



Заславский Евгений Львович, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», начальник сектора, образование – высшее, профессиональный стаж – 45 лет, область научных интересов – ЖРД.



Морозов Рудольф Федорович, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», начальник сектора, образование – высшее, профессиональный стаж – 45 лет, область научных интересов – ЖРД.



Орлов Николай Николаевич, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», главный специалист, образование – высшее, стаж – 43 года, область научных интересов – ЖРД.



Смирнов Игорь Александрович, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», первый заместитель генерального директора – генеральный конструктор, образование – высшее, кандидат физико-математических наук, профессиональный стаж – 27 лет, область научных интересов – ЖРД, радиационная электропроводимость материалов, количество публикаций – 14.



Яковлев Алексей Геннадиевич, «КБХМ им. А.М. Исаева» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», начальник группы, образование – высшее, профессиональный стаж – 21 год, область научных интересов – ЖРД, криогенная техника.

Из уравнения движения ракеты (уравнение Циолковского) следует, что эффективность любого ракетного топлива зависит от скорости истечения газообразных продуктов его сгорания из сопла камеры двигателя ракеты и плотности топлива, определяющей соотношение начальной и конечной масс ракеты. Поэтому изначально к топливам жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) предъявляются требования высоких значений удельного импульса и плотности.

В практике разработок ракетной техники определяющими стали также иные требования к компонентам топлива ЖРД: сначала – доступность, наличие соответствующих производств, благодаря чему обеспечивались короткие сроки создания комплексов ракетных вооружений при минимально возможных затратах, а в дальнейшем, с развитием ракетных вооружений – стабильность при долгом хранении в приемлемом для эксплуатации ракетной техники температурном диапазоне, совместимость с конструкционными материалами двигателя и ракеты, что обуславливает пригодность к ампулизации ракеты, существенно повышающей ее боеготовность.

Соответственно, в первых ракетах космического назначения, разработанных на основе баллистических ракет, в качестве компонентов топлива ЖРД сначала использовались наиболее доступные тогда горючие и окислители: керосин+кислород в ракетах-носителях (РН) «Восток», «Молния», «Союз», а после создания необходимой производственной базы и соответствующей инфраструктуры (системы хранения, заправки и т.д.) – стабильные высококипящие компоненты так называемого «штатного» топлива: несимметричный диметилгидразин (НДМГ) и азотный тетраоксид (четыреокись азота) АТ как горючее и окислитель ЖРД РН «Протон». Композиция НДМГ+АК (азотная кислота) использовалась также в качестве топлива ЖРД РН «Космос».

При разработке ракет-носителей следующих поколений выбор компонентов топлива ЖРД был уже в значительной степени предопределен наличием развитой инфраструктуры производства и эксплуатации указанных выше компонентов топлива ЖРД. При этом

экологические аспекты использования компонентов топлива, как правило, во внимание не принимались.

Между тем, из перечисленных выше компонентов топлива определению «экологически чистый» соответствует лишь жидкий кислород; остальные в той или иной степени являются веществами, загрязняющими и отравляющими окружающую среду; они – токсичны и поэтому имеют установленные санитарными нормами пределы допустимых концентраций паров в воздухе. Кроме того, токсичными могут быть продукты неполного сгорания топлив ЖРД, в состав которых входят некоторые из указанных компонентов. Экологические характеристики этих компонентов представлены в таблице.

Таблица 1

Экологические характеристики компонентов топлива

Компоненты топлива	Экологическая характеристика компонента	Допустимая концентрация, мг/м ³	Токсичность
Керосин	Условно чистый	5	Слабо токсичен
НДМГ	Грязный	0,001	Токсичен
Жидкий кислород	Чистый	—	Нетоксичен
Азотная кислота	Грязный	0,04	Токсичен
Азотный тетраоксид	Грязный	0,085	Токсичен

К характеристикам, представленным в таблице, следует добавить, что НДМГ в природных условиях не разлагается, обладает свойством накапливаться в растительных и животных организмах, поэтому при разливах НДМГ почвы рекультивации не подлежат (требуется их удаление с загрязненных участков с последующей утилизацией).

Остальные представленные в таблице компоненты, за исключением жидкого кислорода, при разливах также существенно загрязняют почвы, однако допускают при незначительной глубине загрязнений возможность их рекультивации, так как вступают в химические реакции и со временем разлагаются или испаряются.

Таким образом, вследствие означенных выше тенденций развития ракетной техники в России в настоящее время находятся в эксплуатации ракеты-носители (или ступени РН) космического назначения, которые по типу используемого топлива ЖРД можно отнести:

- к экологически условно чистым РН с кислородно-керосиновым ЖРД (РН «Зенит», РН «Союз», РН «Молния»);
- к экологически грязным РН с ЖРД на штатном топливе – АТ+НДМГ (РН «Протон К», «Протон М», конверсионные РН «Рокот», «Днепр», а также РН «Космос» с ЖРД на топливе АК+НДМГ).

В результате многолетней эксплуатации этой ракетной техники космического назначения к настоящему времени неблагоприятная экологическая обстановка, обусловленная воздействием токсичных компонентов топлива, наблюдается в местах расположения космодромов, испытательных полигонов, топливных хранилищ, заправочных станций и т.д. Значительные (сотни квадратных километров) территории в отведенных зонах падения отработанных ступеней РН загрязнены и практически выведены из природопользования.

Кроме того, постоянно существует угроза загрязнения обитаемых территорий по курсу полета РН в случае аварии, что уже случалось неоднократно и приводило к необходимости значительных финансовых затрат, связанных с разного рода компенсациями и устранением последствий аварии, в том числе ликвидацией очагов загрязнений при разливах компонентов топлива с последующей рекультивацией или утилизацией почв.

В основном все изложенное выше (тенденции развития, экологическая проблематика) относится также к космическим ступеням ракетных комплексов, использующих ЖРД. В экологическом аспекте космические ступени отличаются от ступеней РН лишь тем, что они не создают проблем в отведенных зонах падения (ввиду отсутствия таковых) – остаются проблемы, связанные с эксплуатацией и аварийными исходами запусков РН.

К космическим ступеням относятся ракетные блоки с жидкостными ракетными двигательными установками, которые обеспечивают коррекцию орбиты или перелетной траектории, торможение космических объектов и рассчитаны на долгое время (до нескольких лет) пребывания в условиях космического пространства (например, корректирующее – тормозные двигательные установки космических кораблей «Союз», «Прогресс», космических аппаратов типа «Луна», «Марс», «Венера», «Фобос» и т.д.), а также разгонные блоки РН с небольшим сроком эксплуатации в условиях космоса (до 1 суток).

И если для первых не существует альтернативы стабильным высококипящим компонентам топлива ЖРД, то разгонные блоки (РБ), ввиду краткосрочности активного применения, допускают использование низкокипящих (криогенных) компонентов топлива ЖРД. Поэтому, в отличие от космических ступеней долговременного

использования, короткие сроки активной эксплуатации РБ (как и РН) открывают возможность улучшения их экологических характеристик за счет внедрения (при создании новых образцов ракетной техники) топливных композиций и предназначенных для них ЖРД в соответствии с критерием «эффективность-экологичность». В соответствии с этим критерием в настоящее время в России по программе развития ракетной техники разрабатывается ряд ракет-носителей семейства «Ангара» (легкого, среднего и тяжелого классов). В перспективе эти РН с ЖРД, использующими экологически условно чистое топливо «керосин+кислород» заменят РН с ЖРД на экологически грязном штатном топливе – РН «Протон», РН «Космос», РН «Днепр», РН «Рокот».

В максимальной степени требованиям экологической чистоты из всех известных ракетных топлив соответствует топливо «кислород+водород». Однако это экологически абсолютно чистое топливо ЖРД из-за малой плотности водорода является наиболее эффективным лишь на верхних ступенях РН:

- на РН сверхтяжелого класса типа «Энергия», начиная со 2-й ступени;
- на РН тяжелого класса типа «Протон», «Ангара V», начиная с 3-й ступени;
- на разгонных блоках РН всех классов.

В России к настоящему времени в соответствии с рассмотренными выше тенденциями развития ракетной техники разработаны и эксплуатируются следующие разгонные блоки: РБ «Л», РБ «ДМ» с ЖРД на экологически условно чистом топливе «керосин+кислород» – используются совместно с РН «Молния», «Протон» и «Зенит»;

РБ «Бриз М», РБ «Бриз К», РБ «Фрегат» с ЖРД 14Д30, С5.98, С5.92 на экологически грязном штатном топливе АТ+НДМГ – используются совместно с РН «Протон М», «Рокот», «Союз».

В отличие от принятой концепции развития РН аналогичных программ, предусматривающих создание новых разгонных блоков с ЖРД на высокоэффективных, экологически чистых компонентах, не существует и разработка их практически не ведется, то есть заменить указанные выше РБ в перспективе нечем. Это предопределяет в дальнейшем необходимость использования совместно с экологически условно чистыми РН «Ангара III», «Ангара V», «Союз 2-1б», «Союз 3», либо устаревших РБ «Л», «ДМ» с ЖРД на топливе «керосин+кислород», существенно уступающем по эффективности топливу «кислород+водород», либо экологически грязных РБ «Бриз М», «Бриз К», «Фрегат», «Фрегат СБ» (использование последних совместно с РН, при запасе заправляемого в баки РБ штатного топлива от 6 т до 20 т, автоматически переводит любой комплекс РН+РБ в ряд экологически грязных изделий).

Например, в ближайшей перспективе уже рассматриваются как единственно возможные комплексы

экологически чистых РН с экологически грязными РБ: РН «Союз 2-1б» + РБ «Фрегат»; РН «Ангара V» + РБ «Бриз М».

Между тем, в России уже давно существует опыт создания и эксплуатации РБ с ЖРД, использующими наиболее эффективное, экологически чистое топливо «кислород + водород».

Еще в 70-х годах прошлого века прошел полный цикл стендовой отработки предназначенный для использования в составе комплекса Н1-Л3 разгонный блок «Р» с кислородно-водородным двигателем (рис. 1), разработанным в КБХиммаш им. А.М. Исаева. В эксплуатацию этот РБ не был принят только лишь по причине закрытия программы Н1-Л3, однако и после ее закрытия двигатели блока «Р» в течение нескольких лет периодически испытывались на наземном стенде, показав рекордную наработку на одном экземпляре (~25000 с) и подтвердив высокие энергетические характеристики (удельный импульс – 445 с при соотношении расходов компонентов топлива – 6 и тяге 7500 кгс).

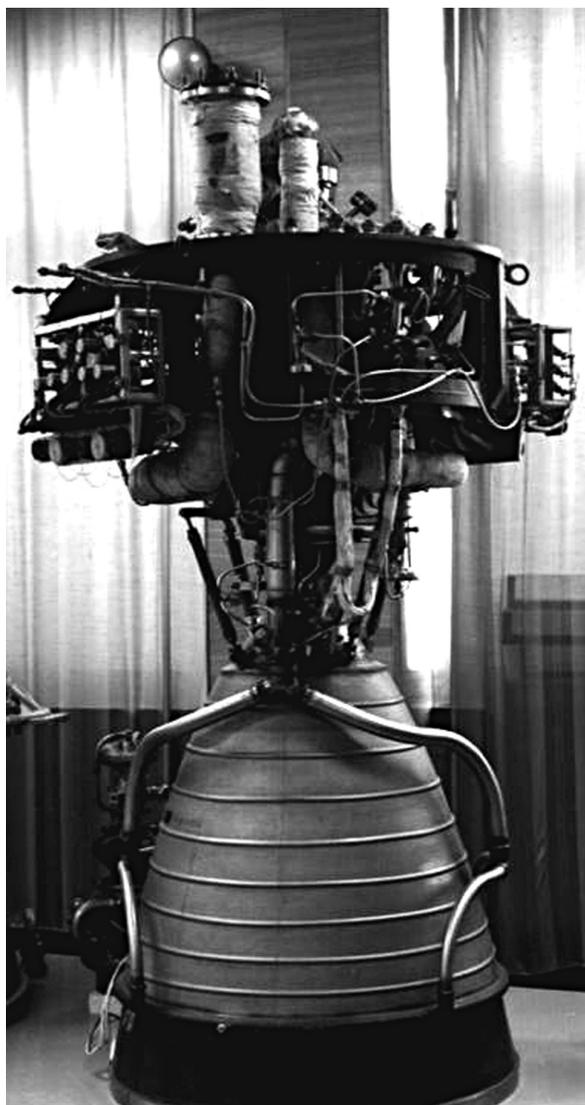


Рис. 1. Кислородно-водородный двигатель
Fig. 1. Oxygen-hydrogen engine

На основе этого двигателя в период с 1991 по 2000 год по заказу ISRO (Индия) в КБХиммаш им. А.М. Исаева был спроектирован, освоен в производстве и отработан кислородно-водородный двигатель КВД1 для криогенного разгонного блока 12КРБ (рис. 2), который прошел 2 летно-конструкторских испытания в составе индийской РН GSLV и успешно эксплуатируется в настоящее время (2 коммерческих пуска РН GSLV). Технология производства двигателя КВД1 к настоящему времени сохранена, производство его может быть возобновлено в течение 1,5 лет. Поэтому данный двигатель можно рассматривать в качестве базового двигателя экологически чистых кислородно-водородных РБ для разрабатываемых в настоящее время РН семейства «Ангара», РН «Союз 2-1б», «Союз-3». Модификации этого двигателя могут быть использованы также в качестве двигателей 3-й ступени РН «Ангара V».

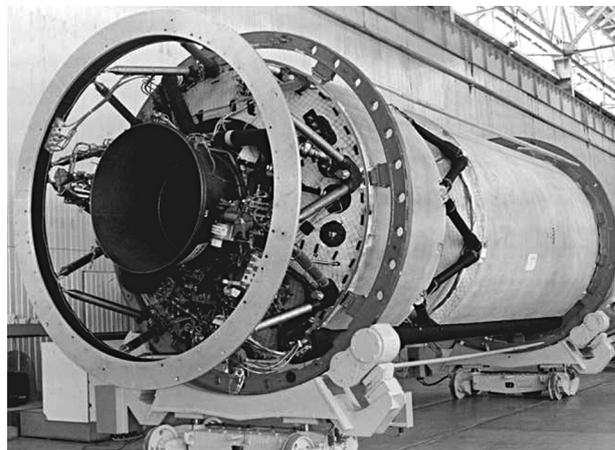


Рис. 2. Криогенный разгонный блок 12КРБ
Fig. 2. Crio booster stage 12CRB

Двигатель КВД1 в полном составе или отдельные его функциональные элементы могут быть использованы в ряде РБ разных размерностей, в этом смысле он является универсальным двигателем; кроме того, конструктивное исполнение двигателя допускает возможность модернизации (без существенных затрат средств и времени) отдельных его частей при сохранении характеристик, определяющих работоспособность двигателя в целом.

Указанные выше возможности обусловлены не имеющим аналогов в мировой практике создания кислородно-водородных ЖРД блочным принципом построения двигателя КВД1 с функциональной ориентацией каждого блока, благодаря чему, исходя из потребности, в РБ могут быть использованы как весь комплект блоков двигателя, так и его отдельные конструктивно автономные блоки.

В состав комплекта блоков двигателя КВД1 входят:

- блок маршевый (БМ);
- 2 блока рулевых (БР);

- блок бустера горючего (ББГ);
- блок бустера окислителя (ББО);
- блок управления (БУ);
- комплект монтажных частей (КМЧ).

Конструктивное единство двигателя образуется в составе двигательной установки (ДУ) после соединения соответствующих входов и выходов блоков трубопроводами ДУ.

БМ (рис. 3) представляет собой ЖРД, выполненный по схеме с дожиганием рабочего тела турбины турбо-насосного агрегата (ТНА) в камере, в состав которого входят ТНА, камера дожигания (КД) с охлаждаемым высотным насадком, газогенератор, элементы регулирования тяги (РТ) и соотношения компонентов топлива (РСК) – дроссели с электроприводами, элементы системы запуска двигателя, пускоотсечные и дренажные клапаны в напорных магистралях, рама для неподвижного крепления БМ к шпангоуту бака ДУ, функциональные датчики расходов и температур компонентов топлива.

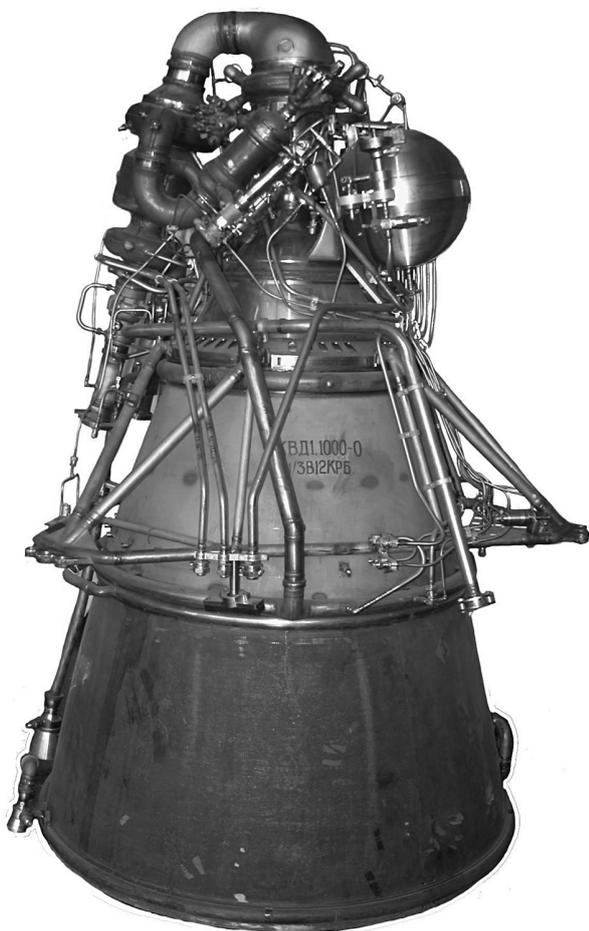


Рис. 3. Блок маршевый двигателя КВД1
Fig. 3. Cruise engine KVD1 unit

Конструкция рамы предполагает расположение БМ в нише бака ДУ, что уменьшает строительную высоту РБ.

БР (рис. 4) представляет собой сборку, включающую рулевую камеру, установленную в двухступенном

шарнирном подвесе, с рамой и закрепленными в ней двумя электроприводами ЭП-24 для качания рулевой камеры, отсечные и обратный клапаны. Блоки рулевые целесообразно закреплять на силовых элементах бака в двигательном отсеке РБ как можно ближе к периферии отсека.

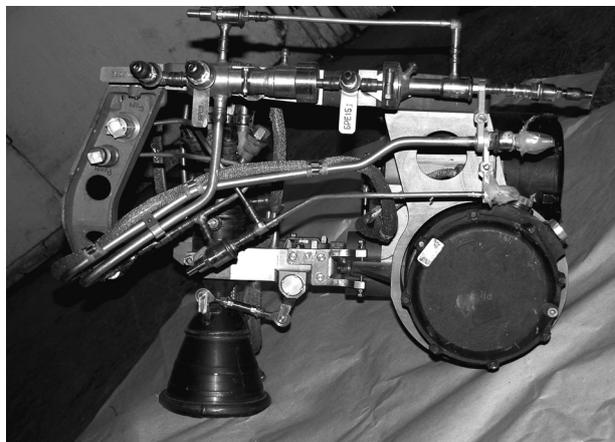


Рис. 4. Блок рулевой двигателя КВД1
Fig. 4. KVD1 engine steering unit

ББГ и ББО также являются автономными сборочными единицами:

ББГ (рис. 5) – сборка бустерного ТНА с клапаном входа (разделительным клапаном в расходной магистрали из бака Г) и отсечными клапанами в гидравлических магистралях блока, смонтированная на основании, являющемся частью днища бака горючего ДУ, в котором должен устанавливаться ББГ;

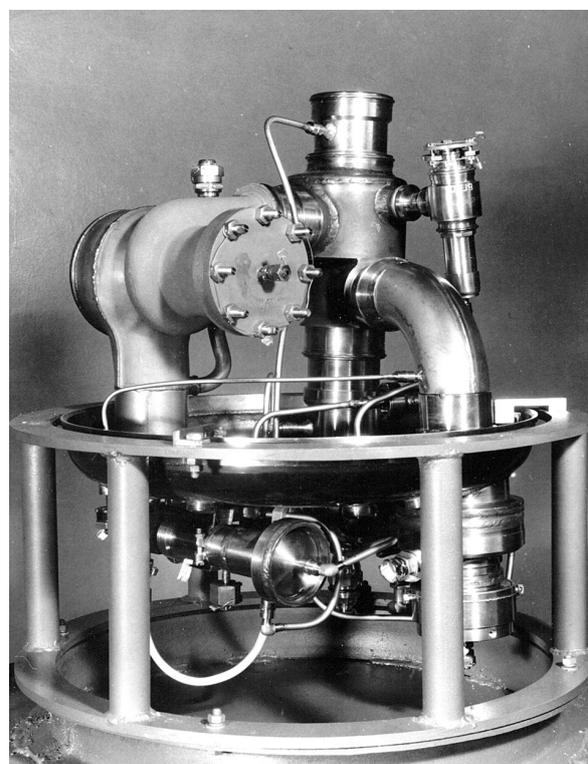


Рис. 5. Блок бустера горючего двигателя КВД1
Fig. 5. Fuel booster pump unit of engine KVD1 engine

ББО (рис. 6) – сборка бустерного ТНА с клапаном входа окислителя (разделительным клапаном в расходной магистрали из бака О) и отсечными клапанами в магистралях блока, – должна устанавливаться в баке окислителя ДУ;

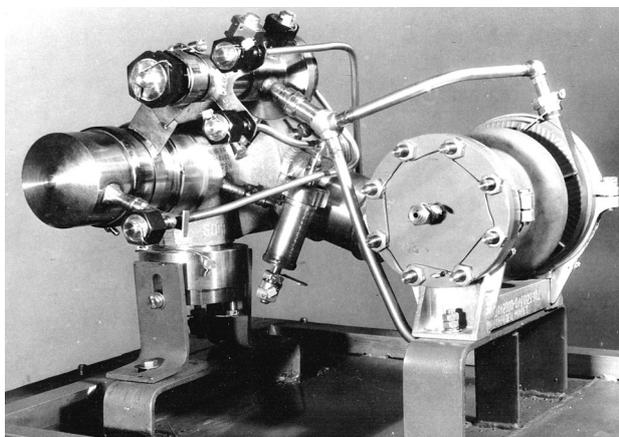


Рис. 6. Блок бустера окислителя двигателя КВД1
Fig. 6. Oxidizer booster pump unit of engine KVDD1

БУ (рис. 7) – сборка комплекта электропневмоклапанов, объединенных по входам общим коллектором подвода газа управления и размещенных в кожухе – контейнере, – устанавливается в двигательном отсеке РБ;



Рис. 7. Блок управления двигателя КВД1
Fig. 7. KVDD-1 engine control unit

КМЧ представляет собой набор одноразовых изолирующих и разделительных пиротехнических устройств, обеспечивающих надежную изоляцию полостей двигателя от полостей баков и окружающей среды – консервацию двигателя в период хранения и предстартовой подготовки и расконсервацию – после срабатывания пиропатронов в полете РН перед началом работы двигателя (установлены между баками и полостями двигателя, на выходе дренажей БМ, БР, в камерах – заглушки).

В соответствии с функциональной ориентацией блоки двигателя КВД1 обеспечивают:

БМ – создание тяги в направлении продольной оси объекта, питание БР компонентами топлива, подачу рабочего тела турбин ББО, ББГ с необходимыми параметрами, подачу пускового рабочего тела в ББГ, выдачу информационных сигналов об объемных расходах компонентов топлива через двигатель в систему управления (СУ) РБ, изменение тяги и соотношения компонентов двигателя по командам СУ РБ, выработку и подачу рабочего тела наддува бака горючего ДУ, дренаж из полостей двигателя и расходных магистралей ДУ при захлаживании, заливке магистралей двигателя и ДУ и после останова двигателя;

БР – угловое отклонение вектора тяги двигателя за счет поворота рулевых камер в двухступенных подвесах электроприводами;

ББГ и ББО – подачу рабочих тел захлаживания магистралей ДУ и двигателя, подачу окислителя и горючего из баков ДУ в БМ с необходимыми параметрами при запуске и работе двигателя на режиме; полную герметизацию выходов из баков в расходные магистрали ДУ РБ, вплоть до начала операций по захлаживанию двигателя; герметичное закрытие выходов баков ДУ в паузах между включениями двигателя и открытие их при включениях двигателя; работоспособность ДУ при минимальных превышениях давлений компонентов топлива над давлением насыщенных паров (по баку горючего – без превышения давления над упругостью пара) в баках ДУ;

БУ – подачу газа управления пневмоклапанами в БМ, БР, ББО, ББГ, а также газа продувки – полостей окислителя – в БМ, БР.

В целом комплект блоков двигателя обеспечивает выполнение следующих функций:

- создание тяги в направлении продольной оси объекта;
- создание управляющих моментов для стабилизации объекта в плоскостях тангажа, рыскания и крена;
- обеспечение работоспособности ДУ при минимальных превышениях давлений компонентов топлива над давлением насыщенных паров (по баку горючего – без превышения давления над упругостью бака) в баках ДУ;
- минимизация затрат инертного газа (гелия) на наддув баков ДУ за счет снижения потребного давления наддува бака окислителя;
- выработка и подача рабочего тела наддува бака горючего ДУ;
- консервация полостей двигателя и баков ДУ;
- 6-кратное включение ДУ;
- проведение подготовительных операций (захлаживание, заливка полостей) перед запуском ДУ;

- изменение тяги и соотношения расходов компонентов по командам СУ объекта;
- герметичное закрытие выходов баков ДУ в паузах между включениями двигателя и открытие их при включениях двигателя;
- выполнение циклограммы включения двигателя по командам СУ;
- безаварийное выключение ДУ при окончании поступления окислителя на вход в двигатель.

Управление запуском и остановом двигателя КВД1 осуществляется посредством подачи (и, соответственно, снятия) электрического напряжения постоянного тока на электрические входы двигателя при наличии газа управления и продувки с необходимыми параметрами на входе в коллектор БУ, а также подачей импульсов электрического напряжения на пиропатроны воспламенителей запальных устройств и пироклапанов.

Регулирование параметров режима работы двигателя и управления вектором тяги осуществляется посредством подачи электрических команд из СУ РБ на электроприводы дросселей и электроприводы качания камер БР.

Следует отметить, что, благодаря блочному принципу построения, двигатель КВД1 по функциональной насыщенности не имеет равных в мире; при этом конструкция его самодостаточна для выполнения всех вышеперечисленных функций, т.е. не требует дополнительного оборудования ДУ, например, бортовых источников рабочих тел для выполнения функции стабилизации объекта или специального оборудования стартового комплекса для обеспечения кондиций среды в полостях ДУ в период подготовки ее на техническом и стартовом комплексах перед стартом РН.

Кроме того, указанное выше распределение функций между блоками двигателя существенно расширяет возможности его модернизации, так как исключается влияние конструктивных изменений, проведенных в одном из блоков двигателя, на функциональные характеристики остальных блоков. Например, введение выдвижного насадка сопла камеры маршевого блока с целью повышения удельного импульса двигателя не влияет на амплитудно-частотные характеристики исполнительных органов системы стабилизации, которые в данном случае определяются кинематикой качания рулевых камер в составе БР; изменение состава, компоновки или замены материалов конструкции элементов ББО, ББГ, БУ с целью снижения их масс не влияет на резонансные характеристики конструкции БМ (что было бы неизбежно при изменении аналогичных элементов в составе БМ) и, следовательно, не может привести к изменению вибростойкости конструкции БМ.

В результате отпадает необходимость дополнительной отработки (обязательной для моноблочной конструкции), имеющей целью экспериментальное обоснование работоспособности и характеристик

модернизированного двигателя в составе полного комплекта блоков (функционально аналогичного моноблоку), что существенно уменьшает затраты на модернизацию двигателя.

Основные эксплуатационные характеристики и конструкционные показатели двигателя КВД1 приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Основные эксплуатационные характеристики двигателя КВД1

Параметр	Значение
Номинальная тяга в вакууме, кгс	7500
Диапазон изменения тяги, кгс	3000...9500
Номинальное значение соотношения расходов компонентов топлива	5,8
Диапазон изменения соотношения расходов компонентов	5...6,2
Удельный импульс при номинальном соотношении расходов компонентов, с	459
Минимально допустимое превышение давления горючего на входе в двигатель (в насос бустера горючего) над давлением насыщенного пара горючего, атм	0
Минимально допустимое превышение давления окислителя на входе в двигатель (в насос бустера окислителя) над давлением насыщенного пара окислителя, атм	0,2
Суммарное время работы, с	до 1200
Число включений, с	до 6
Подтвержденная вероятность безотказной работы двигателя при доверительной вероятности 0,9	0,99
Эквивалентный угол отклонения вектора тяги двигателя, угл.град.	до 2

Таблица 2

Конструкционные показатели двигателя КВД1

Показатель	Значение
Масса блоков, кг	
БМ	292
БР	35,4x2
ББГ	34,4
ББО	17,35
БУ	20
КМЧ	9,25
Масса комплекта блоков в целом, кг	443,8

Показатель	Значение
Габаритные размеры блоков, мм	
БМ	
Высота	2160
Диаметр среза сопла	1270
Диаметр окружности, проходящий через центры стыковочных отверстий рамы	1540
БР	640x650x500
ББГ	Ø483x630
ББО	426,5x420x280
БУ	Ø456x363
Угол отклонения камер рулевых, угл.град.	до 39,5

Как указывалось выше, в конструкцию двигателя КВД1 заложен значительный потенциал модернизации, что дает основание считать реальными перспективы улучшения его эксплуатационных характеристик при минимальных затратах времени и материальных средств. При этом модернизация, направленная на расширение функциональных возможностей двигателя, а также на совершенствование его в части минимизации потребных давлений компонентов топлива на входах в двигатель с целью снижения давлений в баках ДУ, лишена смысла, так как эти характеристики и так являются предельными.

Однако целесообразным является повышение энергомассовых характеристик двигателя (уменьшение массы и увеличение удельного импульса), а также – для удовлетворения требований использования в перспективных РБ – увеличение эквивалентных углов отклонения вектора тяги двигателя и, соответственно, располагаемых моментов стабилизации РБ. В связи с этим в КБХиммаш им. А.М. Исаева проработаны 2 варианта модернизации двигателя КВД1, исключающие необходимость кардинальных изменений конструкций блоков и рабочих процессов двигателя, что связано с выполнением некоторых ограничительных условий.

Основным ограничительным условием при модернизации двигателя является использование в модернизированном двигателе подтвержденных на двигателе КВД1 технических решений, определяющих процессы подготовки к запуску, запуска, останова, регулирования двигателя при работе на режиме, то есть процессы, определяющие основной объем отработки любого двигателя, а также прочностные характеристики и вибростойкость конструкции. К таким техническим решениям относится прежде всего блочный принцип построения двигателя, при котором:

- – блоки бустеров расположены в соответствующих баках ДУ, а бустеры, после заправки баков, залиты компонентами топлива и отделены от полостей двигателя входящими в состав каждого блока клапанами;

- – управление угловым положением вектора тяги двигателя осуществляется отклонением рулевых камер, установленных в шарнирных подвесах каждого рулевого блока, посредством электроприводов ЭП-24 (разработка ГКНПЦ им. М.В. Хруничева), при этом рулевые блоки (как и блок управления) закреплены на днище бака окислителя ДУ.

Указанное выше ограничительное условие налагает также требование на конструкцию ДУ, в состав которой должен входить модернизированный двигатель, по соответствию ее особенностям конструкции разгонного блока 12КРБ – нижнее расположение бака окислителя, наличие ниши в баке окислителя для размещения блока маршевого с закреплением его рамы на шпангоуте бака, ограничивающем края ниши.

Также модернизированный двигатель должен заимствовать у двигателя КВД1 системы запуска, пиротехнического зажигания, элементы системы регулирования тяги и соотношения расходов компонентов – датчики расходов и температур компонентов топлива – в качестве чувствительных элементов и дроссели в магистралях питания газогенератора и камеры окислителя с электроприводами ЭП-23 (разработка ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) – в качестве исполнительных органов СУ РБ.

Циклограмма работы и пневмогидравлическая схема (ПГС) модернизированного двигателя должна обеспечивать соответствующую двигателю КВД1 временную последовательность срабатывания клапанов блоков двигателя при его запуске и останове.

Конструкция модернизированного двигателя должна обеспечивать выполнение всех функций, свойственных двигателю КВД1, за исключением функции разделения полостей двигателя с окружающей средой (необходимые кондиции среды во внутренних полостях двигателя и ДУ можно обеспечить посредством наземных (стартовых) систем (например, продувкой или балластированием полостей двигателя гелием).

Должна быть сохранена конструктивная схема (компоновка) БМ, регламентирующая взаимное расположение основных агрегатов и трубопроводов с механическими связями между ними.

Габариты блоков модернизированного двигателя должны укладываться в габариты блоков двигателя КВД1.

Также при модернизации двигателя КВД1, направленной на повышение его энергетических характеристик, должны быть учтены следующие ограничения:

1. Температура рабочего тела турбины не должна превышать 930 °С (максимальная температура, подтвержденная испытаниями турбины в составе КВД1).
2. Обороты ротора ТНА не должны превышать величин, при которых окружающая скорость на среднем

диаметре лопаточного венца турбины равна 470 м/с (подтверждено испытаниями и эксплуатацией турбин двигателей С5.92, 14Д30 при температуре рабочего тела до 930 °С).

3. Перепад давления на дросселях не должен быть меньше 10 атм во всем диапазоне регулирования двигателя.

4. Тяга рулевой камеры не должна превышать величины 250+10 кгс (величина, полученная при отработке двигателя КВД1).

В обоих вариантах модернизации двигателя КВД1 вместо 2-х рулевых блоков в состав комплекта блоков двигателя входят 4 блока рулевых, в основе конструкции которых – рулевая камера с радиационно охлаждаемым насадком сопла, установленная на валу электропривода ЭП-24; из состава КМЧ исключены элементы консервации двигателя – пироустройства, изолирующие полости БМ от окружающей среды; упрощена пневмогидравлическая схема (ПГС) БМ, изменены конструкции отсечных клапанов и дросселей, введена титановая рама вместо стальной, изменена конструкция БУ: уменьшено количество управляющих электроклапанов, их компоновка в контейнере и форма контейнера.

Кроме того, в менее затратном варианте модернизации (вариант 1, табл. 3) с целью снижения массы изменена конструкция камеры блока маршевого, в частности – конструкция форсуночной головки (с сохранением ее функциональных характеристик), уменьшена толщина наружной оболочки камеры, в состав ее введен радиационно-охлаждаемый насадок сопла из углеродно-углеродного композиционного материала (УУКМ); при этом конфигурация и геометрическая характеристика газового тракта камеры сохраняются аналогичными камере двигателя КВД1.

Более глубокий (и затратный) вариант модернизации (вариант 2, табл. 3), кроме указанных выше изменений конструкции камеры, предусматривает: изменение конфигурации газового тракта – уменьшение диаметра критического сечения при сохранении диаметра среза сопла, вследствие чего увеличивается геометрическая степень расширения сопла; применение в составе БМ турбонасосного агрегата (ТНА), разработанного на базе созданного в КБхиммаш им. А.М. Исаева экспериментального ТНА 1202-0, с меньшей массой и более высоким коэффициентом полезного действия; выполнение части агрегатов и элементов конструкции ББГ и ББО из алюминиевого сплава (взамен нержавеющей стали). В результате модернизации по варианту 1 снижается масса двигателя при сохранении его параметрического соответствия двигателю КВД1 – при этом практически исключается необходимость дополнительной отработки модернизированного двигателя (необходима лишь проверка работоспособности).

При модернизации по варианту 2, кроме более значительного, чем в варианте 1, снижения массы,

повышается удельный импульс двигателя, однако, в этом случае нарушается параметрическое соответствие двигателю КВД1, вследствие чего возникает необходимость отработки режима работы модернизированного двигателя.

Таблица 3

Параметры и показатели модернизированных двигателей КВД1

Параметр (показатель)	Значение	
	Вариант 1	Вариант 2
Номинальное соотношение расходов компонентов топлива	5,5	5,5
Удельный импульс	461	469
Эквивалентный угол отклонения вектора тяги, угл.град.	3,8	4,3
Масса комплекта блоков двигателя, кг	345	305
Углы отклонения камер рулевых, угл.град.	до 90	до 90

Кроме упомянутых вариантов модернизации двигателя КВД1, в КБхиммаш им. А.М. Исаева проведены проектные, конструкторские и экспериментальные работы по созданию универсальной модификации двигателя КВД1, предназначенной для использования как в РБ, так и в качестве двигателей 3-ьих ступеней РН тяжелого класса. Компоновка двигательных установок 3-ей ступени, предполагающих использование связки из 4-х двигателей, исключает возможность применения в ее составе рулевых блоков (как в РБ), поэтому модификация двигателя КВД1, получившая индекс КВД1М3, представляет собой моноблок – блок маршевый, совмещающий функцию создания тяги вдоль оси ступени с функцией создания управляющих моментов стабилизации в плоскостях тангажа и рыскания. Для этого в конструкции двигателя КВД1М3 между расположенной сверху рамой крепления и моноблоком предусмотрен шаровой шарнир с двумя степенями свободы и система гибких трубопроводов, обеспечивающих возможность углового отклонения двигателя в 2-х плоскостях стабилизации; кроме того, в конструкции моноблока использованы модернизированные (в соответствии с вариантом 1 модернизации двигателя КВД1) камера и ТНА, а также элементы ПГС, в состав моноблока включены электропневмоклапаны управления. Проведенные экспериментальные работы, в том числе, огневые испытания экспериментальных образцов двигателя КВД1, подтвердили возможность его форсирования по тяге до уровня 11,5 тс. Аналогичные подтверждения были получены при огневых испытаниях форсированного по тяге двигателя КВД1А (9,5 тс), проведенных в обеспечение поставок в составе разгонных блоков 6Л12КРБ, 7Л12КРБ в ISRO.

Макет двигателя КВД1М3 представлен на рис. 8, а его параметры – в табл. 4.

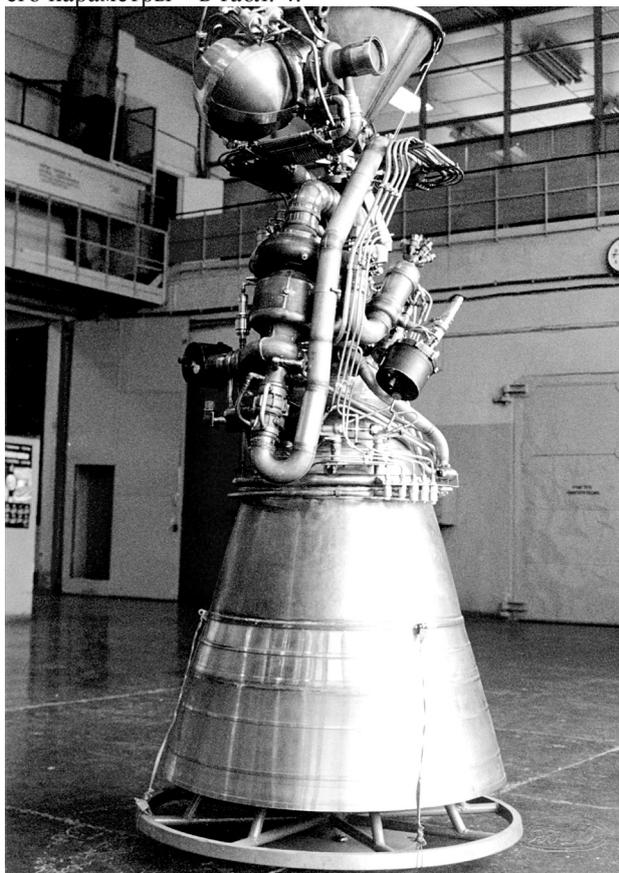


Рис. 8. Двигатель КВД1М3 (макет)
 Fig. 8. KVDM3 engine (mock-up)

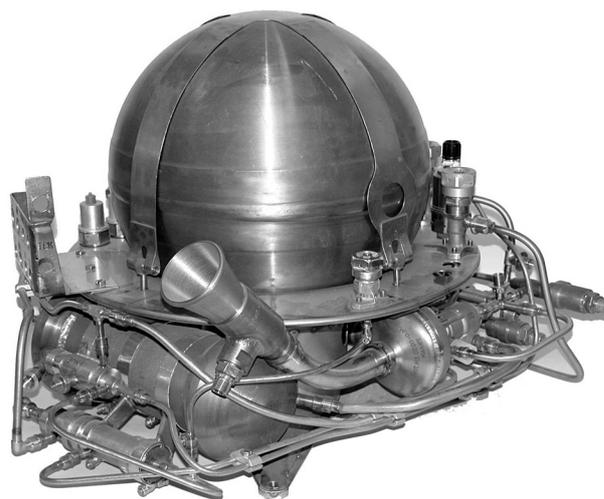


Рис. 9. Бортовой источник питания (макет)
 Fig. 9. On-board power source (mock-up)

Таблица 5

Характеристики БИП М3

Параметр (показатель)	Значение
Расход масла, л/мин	16,0
Давление подачи масла, кгс/см ²	114
Температура масла на выходе БИП, °С	0...60
Время автономной работы, с	4
Габаритные размеры, мм	460x540x600
Масса, кгс	35

Таблица 4

Характеристики двигателя КВД1М3

Параметр (показатель)	Значение
Номинальная тяга, кгс	10500 (7500)
Номинальное соотношение расходов компонентов топлива	5,9
Удельный импульс, с	463
Минимальное превышение давления на входе над давлением насыщенных паров окислителя горючего, атм	1,5 3
Максимальный угол отклонения вектора тяги, угл.град.	6
Высота, мм	2566
Диаметр среза сопла камеры, мм	1200
Масса, кгс	269

Для совместного использования с двигателем КВД1М3 в КБХиммаш им. А.М. Исаева разработан бортовой источник питания гидравлической системы поворота двигателя в шарнире для изменения направления тяги – БИП М3 (рис. 9), обеспечивающий подачу в гидросистему рабочего тела (масла) с заданными параметрами (табл. 5).

К числу двигателей на экологически чистых компонентах топлива следует отнести также разработанный в КБХиммаш им. А.М. Исаева на базе блока маршевого двигателя КВД1 экспериментальный двигатель на топливе «кислород+метан» (рис. 10). ЖРД на этом топливе могут быть наиболее эффективными при использовании в составе РБ и средств межорбитальной транспортировки (СМТ) с относительно большим сроком активной эксплуатации, когда потери водорода на испарение становятся неприемлемыми.

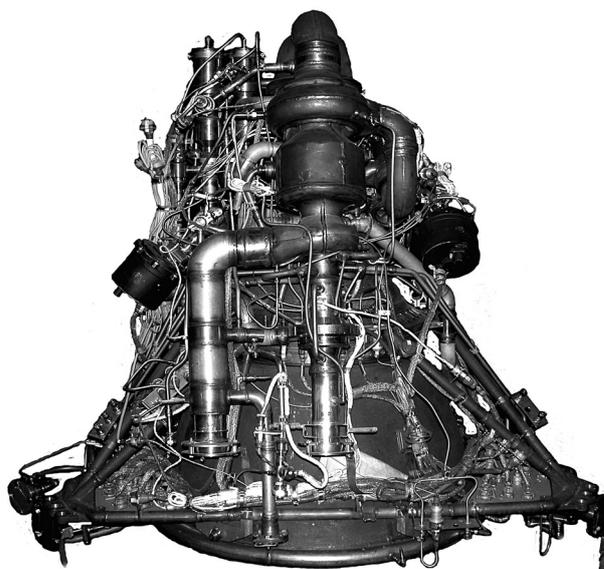


Рис. 10. Кислородно-метановый двигатель
 Fig. 10. Oxygen-methane engine

Схемные решения и конструкция экспериментального кислородно-метанового двигателя в значительной мере заимствованы у блока маршевого двигателя КВД1, однако конструкции основных агрегатов – камеры и ТНА – практически новые. Новой является и система запуска кислородно-метанового двигателя. В настоящее время экспериментальный двигатель проходит огневые испытания с целью изучения рабочих процессов в ЖРД, использующих метан в качестве горючего. Получены первые положительные результаты, на основании которых можно прогнозировать следующие основные параметры кислородно-метанового двигателя РБ (СМТ) (табл. 6).

Таблица 6

Основные параметры кислородно-метанового двигателя РБ (СМТ)

Обозначение параметра	Величина
Тяга, кгс	7500
Соотношение расходов компонентов	3,4
Удельный импульс, с	385

Представленный выше ряд кислородно-водородных двигателей (двигатель КВД1, его модернизации, двигатель КВД1М3) по размерности оптимален лишь для разгонных блоков РН тяжелого класса и переразмерен для РБ РН среднего класса, для которых КБХиммаш им. А.М. Исаева предложена концепция многокамерных кислородно-водородных двигателей с турбонасосной системой подачи топлива на основе рулевых камер и агрегатов двигателя КВД1, а также агрегатов других двигателей КБХиммаш, и в соответствии с этой концепцией проведены проектные проработки восьмикламерного и четырехкамерного двигателей, выполненных по схеме без дожигания рабочего тела турбины, с тягой, соответственно, 2 тс и 1 тс. Общий вид 8-камерного двигателя с тягой 2 тс представлен на рис. 11.

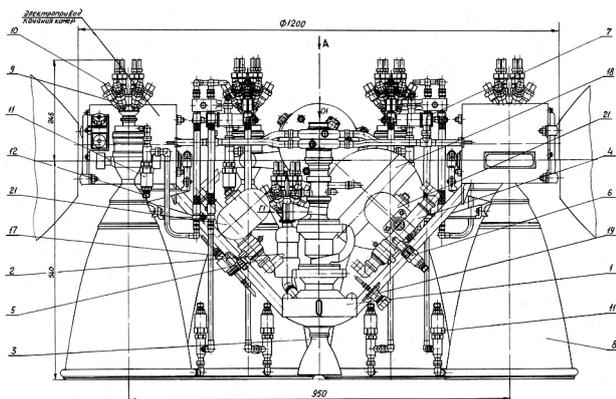


Рис. 11. Кислородно-водородный двигатель на основе рулевых камер двигателя КВД1 (проект)

Fig. 11. Oxygen-hydrogen engine on the base of KVD1 engine steering chambers (project)

Двигатели в комплекте с блоками бустеров предназначены для выполнения следующих функций:

- создание тяги по оси РБ и изменение ее по командам системы управления (СУ) РБ;

- создание управляющих усилий стабилизации объекта по каналам тангажа, рыскания и крена по командам СУ РБ;
- изменение расхода окислителя для регулирования и поддержания заданного соотношения расходов компонентов топлива через двигатель;
- выработка и подача в бак горючего рабочего тела наддува – холодного газообразного водорода для поддержания потребного давления в баке;
- шестикратное включение (5 включений – в соответствии с программой полета РБ, 1 включение – на контрольно-технологическом испытании);
- подача компонентов топлива для захлаживания магистралей, включая магистрали ДУ, перед каждым включением;
- выполнение команд циклограммы включения двигателя по командам СУ РБ;
- останов с переходом на конечную ступень тяги, а также – по окончании поступления окислителя на вход в двигатель с выдачей соответствующего электрического сигнала в СУ РБ.

Кроме указанного выше, восьмикламерный двигатель обеспечивает выполнение функции горячего резервирования посредством отключения по командам СУ РБ 2-х диаметрально противоположных камер в случае нарушения функционирования одной из них с выдачей электрических сигналов в СУ РБ о нарушении ее функционирования.

Восьмикламерный двигатель конструктивно представляет собой 4 блока камер и блок подачи топлива в камеры, связанные рамой с закрепленными на ней агрегатами и топливными трубопроводами. В состав каждого из блоков камер входят 2 доработанные в части увеличения степени расширения сопла рулевые камеры двигателя КВД1, установленные в одноосных подвесах, кинематически связанные с закрепленным в подвесе между камерами электрическим приводом ЭП-24 (т.е. каждый привод обеспечивает поворот 2-х камер), гибкие трубопроводы, пускоотсечные клапаны, а также – элементы ПГС, обеспечивающие горячее резервирование (функциональные датчики давления и отсечные пироклапаны). Корпуса одноосных подвесов 4-х блоков камер содержат также элементы крепления к силовому поясу бака ДУ и являются конечными элементами крестообразной рамы двигателя. В центральной зоне рамы по оси симметрии двигателя расположен несущий элемент блока подачи – турбонасосный агрегат с выхлопным соплом на выходе из турбины. Блок подачи включает также газогенератор, пускоотсечную арматуру. ТНА выполнен на основе элементов конструкции ТНА двигателя С5.92 (изготавливается в КБХиммаш), из которых заимствованы рабочее колесо турбины, насос окислителя, разделительный узел между насосами, ходовая часть насоса окислителя. Вновь разрабаты-

ваемыми элементами конструкции ТНА являются двухступенчатый насос горючего, разделительный узел между насосом горючего и турбиной, сопловой аппарат 2-й ступени турбины.

На крестообразной раме двигателя закрепляются агрегаты регулирования – дроссели РТ и РСК с электрическими приводами, а также пускоотсечная арматура, ресивер (емкость для пускового рабочего тела), электроклапаны управления и т.д. Все агрегаты, за исключением дросселей и газогенератора, заимствованы либо из комплекта агрегатов двигателя КВД1, либо других двигателей и изготавливаются в настоящее время мелкими сериями.

Четырехкамерный двигатель имеет аналогичную компоновку; отличие лишь в количестве камер (по одной – в каждом блоке камер) и отсутствии пироклапанов и функциональных датчиков давления, обеспечивающих функции горячего резервирования. В комплекты поставки двигателей могут быть включены предназначенные для установки в баках конструктивно автономные блоки бустеров, в состав которых входят бустеры, выполненные на основе бустеров двигателя 14Д30 (изготавливаются в КБХиммаш) с комплектами разделительных клапанов, заимствованных из состава двигателей, также изготавливаемых в КБХиммаш.

В двигательной установке блоки бустеров должны быть связаны с двигателем магистралями, обеспечивающими подачу компонентов топлива из блоков бустеров в двигатель и рабочих тел турбин бустеров – из двигателя в блоки бустеров:

- жидкого окислителя после насоса О ТНА – для привода бустера О;
- газообразного горючего после насоса Г ТНА – для привода бустера Г.

В бустере О предусмотрен сброс рабочего тела турбины на выход насоса бустера О; схема блока бустера Г предполагает подачу рабочего тела с выхода турбины бустера Г в подушку бака Г в качестве газа наддува.

Управление запуском и остановом двигателей осуществляется посредством подачи (с последующим снятием) электрического напряжения постоянного тока на электрические входы при наличии газа управления и продувки с требуемыми параметрами на соответствующих входах в двигатели, а также подачей импульсов электрического напряжения на пиропатроны воспламенителей запальных устройств и пироклапана (при запуске).

Регулирование режимов работы двигателей и управление вектором тяги осуществляется посредством подачи электрических команд из СУ РБ на электроприводы дросселей и электроприводы поворота камер в одноосных подвесах, соответственно.

Для выдачи сигналов об окончании подачи окислителя в двигателях предусмотрены сигнализаторы давления на выходе насосов О ТНА.

Обеспечение функции горячего резервирования восьмикламерного двигателя осуществляется подачей импульсов электрического напряжения на пиропатроны отсечных пироклапанов в магистралях питания диаметрально противоположных камер в случае аномального изменения режима работы одной из них.

Для формирования сигнала об аномальной работе каждой камеры используются показания функционального датчика давления окислителя на входе в форсуночную головку этой камеры вкупе с непрогнозируемым изменением углов отклонения (до упора) камер, установленных в перпендикулярной плоскости стабилизации.

Параметры многокамерных кислородно-водородных двигателей представлены в табл. 7.

Таблица 7

Характеристики многокамерных кислородно-водородных двигателей

Параметр (показатель)	Значение	
	8-камерный двигатель	4-камерный двигатель
Тяга, кгс	2000	1000
Соотношение расходов компонентов	5,6	5,5
Удельный импульс	457	455
Максимальный угол отклонения камер в одноосном подвесе, угл.град	6	45
Минимальное превышение давления над давлением насыщенных паров на входах в насосы бустеров окислителя горючего на входах в насосы ТНА двигателя окислителя горючего, кгс/см ²	0,2 1 1,5	0,2 1 1,5
Высота, мм	785	785
Габаритный диаметр, мм	1200	1200
Масса, кг, не более	165	105
Масса блоков бустеров, кг, не более	7	7

В работе [1] представлена одна из первых оценок эффективности использования многокамерных двигателей представленного здесь концептуального ряда в составе РБ ракеты-носителя среднего класса. Оценка проводилась применительно к РН «Союз-2-1б» в виде сравнения величин полезных нагрузок (ПН), выводимых на геостационарную орбиту (ГСО) при использовании РБ с кислородно-водородными двигателями тягой 1 тс, 2 тс, а также с двигателями на кислородно-керосиновом, кислородно-метановом и штатном топливе (типа РБ «Фрегат») с тягой 2 тс, при условии старта РН с космодрома Байконур и 4-импульсным выведением космического аппарата (КА) на ГСО:

- 1 включение – довыведение КА на базовую орбиту;
- 2 включение – выведение КА на первую промежуточную орбиту;
- 3 включение – выведение КА на геопереходную орбиту;
- 4 включение – выведение КА на ГСО.

Результаты сравнения, представленные в [1], показывают, что применение в РБ РН «Союз-2-1б» указанных выше многокамерных кислородно-водородных двигателей обеспечивает прирост ПН на ГСО:

- 650...700 кг (до 64 %) – по сравнению с РБ «Фрегат» и РБ с ЖРД на кислородно-керосиновом топливе;
- 280...330 кг (до 23 %) – по сравнению с РБ, использующим ЖРД на кислородно-метановом топливе.

Оценки эффективности использования двигателей типа КВД1 в РБ РН тяжелого класса, проведенные в разное время ведущими разработчиками

русской космической техники (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, РКК «Энергия» и др.), дают приблизительно те же результаты по относительному приросту ПН на ГСО.

Таким образом, применение во вновь разрабатываемых РБ представленных в настоящей публикации ЖРД на кислородно-водородном топливе не только обеспечит практически полную экологическую чистоту перспективных комплексов РН+РБ, но и существенно повысит их эффективность.

Список литературы

Konstantinov M.S., Skryabin M.I., Morozov V.I., Derjagin Y.A. The analysis of transport opportunities of an oxygen-hydrogen chemical upper stage at insertion into geostationary orbit for space system on the basis of a launcher Soyuz 2-1b. Доклад на 57-м Международном астронавтическом конгрессе. Валенсия, Испания, 2006.

