

# ЖРД

## АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ФИРМ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ

Военная академия РВСН им. Петра Великого:

**Александр Башилов**, доцент, к.т.н

**Геннадий Самарин**

Сегодня в Западной Европе созданием и эксплуатацией жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) для ракет-носителей (РН) занимаются два ведущих двигателестроительных концерна – французский SEP (Societe Europeene de Propulsion – "Европейское общество силовых установок") и немецкий MBV (Messerchmitt-Bolkow-Blohm – "Мессершмитт-Бельков-Блом"). Технический уровень всех этих двигателей соответствует уровню аналогичных американских ЖРД, созданных 5...10 годами ранее, а их конструкция основана как на собственных оригинальных разработках, так и на американских лицензиях. Остановимся на наиболее интересных особенностях этих двигателей.

### Азотно-кислотные ЖРД

Созданием мощных однокамерных ЖРД на азотно-кислотных окислителях концерн SEP занимается с начала 1960-х гг. Им разработаны ЖРД VEXIN и VALOIS для РН типа Diamant, а также серия ЖРД VIKING для РН семейства Ariane. Все эти двигатели просты по конструкции, надежны, но не отличаются высокой экономичностью (по сравнению с аналогичными российскими и американскими образцами).

Особенностью данных двигателей являются камеры сгорания без наружного регенеративного охлаждения. Они состоят из стальных сферических смесительных головок и сварных корпусов, изготовленных из жаропрочных сталей. Изнутри корпуса камер покрыты теплозащитными покрытиями из циркона (ЖРД VEXIN и VALOIS) или окиси циркония (ЖРД VIKING), а в их критических сечениях установлены тугоплавкие вставки соответственно из графита или фенопласта, армированного окисью кремния.

Смесительные головки всех камер сборные. Они образованы внутренней литой стальной полусферой и покрывающим ее стальным штампованным коническим днищем. В основании полусферы по окружности расположены однокомпонентные смесительные элементы (форсунки), обеспечивающие столкновение струй впрыскиваемых компонентов. Подача компонентов топлива осуществляется на 10...12 поясов радиальных отверстий, размещенных на кольцевых, чередующихся по окислителю и горючему рядах. Горючее к элементам поступает из коллектора, приваренного по периферии голо-



Двигатели Viking для ракеты-носителя Ariane 4

вки, а окислитель подводится через центральное отверстие в наружном днище и зазор между ним и полусферой. Соотношение компонентов в камерах составляет: 3,2 (ЖРД VEXIN); 2,05 (ЖРД VALOIS); 1,87 (ЖРД VIKING). До 10 % горючего в каждом из этих ЖРД расходуется на внутреннее завесное охлаждение камеры.

ЖРД VEXIN и VALOIS имеют вытеснительную систему подачи топлива. Для наддува вырабатывается газ с большим содержанием паров воды (парогаз). Его получают при смешивании воды с горячим генераторным газом, произведенным в пороховом твердотопливном газогенераторе (ЖРД VEXIN) или в жидкостном двухкомпонентном газогенераторе на основных компонентах (в ЖРД VALOIS). Такой способ получения низкотемпературного газа является уникальным и больше нигде, кроме ЖРД концерна SEP, не применяется. Параллельно этот же парогаз используется в пневмоприводах, осуществляющих отклонение камер ЖРД в карданных подвесах на углы до 4° в плоскостях тангажа и рыскания, а также в четырех поворотных рулевых соплах, обеспечивающих управление полетом РН Diamant по крену. Запуск обоих ЖРД производится двумя ступенями с помощью двухпозиционных пироклапанов пуска на входе в двигатель. Выключение одноступенчатое, с помощью пироклапанов отсечки. На ЖРД VEXIN, основная топливная пара которого является несамовоспламеняющейся, применяется химическое зажигание. Оно осуществляется с помощью пускового химического горючего (фурфурилового спирта), размещенного в

герметичной капсуле, которая установлена в магистрали подачи основного горючего в камеру.

В ЖРД серии VIKING используется насосная подача всех компонентов с помощью одного одновального моноблочного турбо-насосного агрегата (ТНА). Он содержит двухступенчатую активную осевую газовую турбину, расположенную на валу консольно, и три одноступенчатых центробежных насоса - горючего, окислителя и воды. Расход воды, обеспечивающей охлаждение корпуса газогенератора и разбавление произведенного газа, составляет около 1,5 % суммарного расхода основных компонентов. Все насосы имеют односторонние радиальные входы и выходы, а также крыльчатки открытого типа. В конструкции насосов применены алюминиевые сплавы, а в конструкции турбин использованы жаропрочные и жаростойкие стали.

Привод ТНА обеспечивает охлаждаемый водой газогенератор, работающий на основных компонентах. Полученный высокотемпературный газ разбавляется водой для снижения его температуры примерно до 1100К. Отработав на турбине, парогаз повторно разбавляется водой до температуры около 480К. На первых ступенях всех РН серии Ariane с ЖРД VIKING-2 и VIKING-5, а также на жидкостных стартовых ускорителях PAL с ЖРД VIKING-6 этот дважды разбавленный парогаз применяется для наддува баков. На вторых ступенях данных РН с ЖРД VIKING-4, баки которых наддуваются гелием от специальной газобаллонной системы, парогаз поступает в систему рулевых сопел, обеспечивающих управление полетом по крену.

Во всех ЖРД серии VIKING разбавленный парогаз используется также для привода плунжерных насосов вспомогательной масляной гидросистемы, питающей рулевые машинки отклонения двигателей. На первых ступенях отклоняются все четыре ЖРД (максимальный угол 5°), установленные в шарнирных подвесах, что обеспечивает управление полетом РН по всем осям стабилизации. На вторых ступенях, оснащенных одним ЖРД в карданном подвесе, отклонение осуществляется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на углы до 4°. Оно обеспечивает управление полетом РН по осям тангажа и рыскания, а управление по крену берет на себя система рулевых сопел, работающих на низкотемпературном парогазе.

Запуск и выключение ЖРД серии VIKING осуществляется с помощью пуско-отсечных клапанов на входе в насосы ТНА. Начальной раскрутки последнего не требуется, поскольку двигатель запускается по принципу "самозапуска" от давления компонентов на его входе. В процессе работы производится регулирование тяги (путем изменения подачи компонентов в газогенератор) и стабилизация соотношения компонентов в камере (путем перепуска части окислителя с выхода соответствующего насоса ТНА на его вход). Выключение - двухступенчатое, сначала газогенератора (отсечкой подачи окислителя), затем всего ЖРД (отсечкой подачи в двигатель всех компонентов).

С 1983 г. в совершенствовании конструкции газогенератора и ТНА ЖРД VIKING принимает участие концерн MBB, который также обеспечивает производство и модернизацию камер, автоматики и узлов общей сборки. В целом, азотно-кислотные ЖРД серии VIKING являются достаточно мощными, имеют простую конструкцию, низкую стоимость и высокую надежность. Они обеспечивают успешное выполнение большинства западноевропейских космических программ, а также коммерческие пуски РН Ariane.

Еще одним азотно-кислотным ЖРД, созданным концерном MBB для третьей ступени РН Europa в 1971 г., является небольшой однокамерный ЖРД L-5 многократного включения с вытеснительной системой подачи обоих компонентов топлива. Необходимый для этого наддув баков РН (до давления 1,82 МПа по окислителю и 1,92 МПа по горючему) обеспечивается соответствующей гелиевой газобаллонной системой.

В состав двигателя входят: камера, агрегаты автоматики, шарнирный узел качания и сварная трубчатая рама. Камера состоит из трех блоков - смесительной головки, двухстенного оболочечного корпуса (до степени расширения 28) и неохлаждаемого соплового насадка. Смесительная головка - плоская, литая из алюминия. Ее однокомпонентные смесительные элементы в виде наклонных отверстий обеспечивают столкновение струй впрыскиваемых компонентов. Корпус - паяно-сварной, титановый, охлаждаемый горячим. Сопловой насадок из титанового сплава. Степень расширения сопла с насадком равна 77. Шарнирный подвес допускает возможность отклонения камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на углы до 8°. Свободу этих отклонений обеспечивают гибкие сильфонные участки трубопроводов.

Управление запуском и выключением ЖРД осуществляются пневматические многоходовые пуско-отсечные клапаны, установленные на головке камеры. Двигатель допускает до 20 включений в одном полете при значительном (до 6000 с) ресурсе работы. В настоящее время он дорабатывается для третьей ступени перспективной РН Ariane-5.

### Кислородно-водородные ЖРД

Разработку небольших кислородно-водородных ЖРД для верхних ступеней РН Europa концерны SEP и MBB начали в середине 1960-х гг. независимо друг от друга. Концерн SEP разрабатывал четырехкамерный ЖРД SEPR с тягой около 60 кН, насосной подачей обоих компонентов топлива и простой схемой без дожигания при низком (порядка 3 МПа) внутрикамерном давлении. Двигатель должен был допускать трехкратное включение в полете. Концерн MBB создавал альтернативный однокамерный ЖРД ORHOS практически с такими же характеристиками. Но обе компании в ходе своей работы встретились со значительными трудностями, и к моменту прекращения работ над РН Europa оба ЖРД проходили только стендовую отработку.

После создания в 1975 г. Европейского Космического Агентства и начала работ над новыми РН серии Ariane, концерны SEP и MBB решили объединить свои усилия в создании кислородно-водородных ЖРД. Это позволило к 1979 г. закончить разработку первого западноевропейского ЖРД указанного типа, получившего индекс HM-7. Он объединил в себе лучшие конструктивные и схемные решения двигателей SEPR и ORHOS и явился первым в мире ЖРД, созданным в рамках международной кооперации.

HM-7 является однокамерным двигателем без дожигания. Он имеет насосную подачу обоих компонентов одним ТНА, привод которого обеспечивает восстановительный газогенератор на основных компонентах топлива. Двигатель устанавливается в карданном подвесе и отклоняется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях тангажа и рыскания на углы до 3°. Для управления по крену используется система подвижных рулевых сопел на газообразном водороде.

### Характеристики западноевропейских азотно-кислотных ЖРД

Тип ЖРД	VEXIN	VALOIS	VIKING-2	VIKING-5	VIKING-4	L-5
Год создания	1965	1967	1979	1984	1984	1971
Фирма	SEP	SEP	SEP	SEP, MBB	SEP, MBB	MBB
Ракета-носитель	Diamant-A	Diamant-B	Ariane-1	Ariane-3	Ariane-3	Ariane-5
Компоненты топлива	AK+скипидар+ вода	AT + НДМГ+ вода	AT + НДМГ+ вода	AT + НДМГ + вода	AT + НДМГ + вода	AT+AZ-50
Тяга у земли, кН	247	348	610	677	790(в пустоте)	23(в пустоте)
Удельный импульс, Н·с/кг	1990	2143	2390	2470	2900	3040
Давление в камере, МПа	1,76	2,05	5,4	5,85	5,85	1,0
Расширение сопла	3,6	5,2	14	14	21	77
Масса, кг	390	415	695	750	760	214 (ДУ)
Время работы, с	95	120	140	205	130	6000
Высота/диаметр, м	1,8/1,0	2,2/1,2	2,9/1,2	3,1/1,2	3,9/1,7	1,4/1,2



Подготовка к старту Ariane 5

Камера, разработанная MBB, имеет современную разборную конструкцию, аналогичную примененной в американском ЖРД SSME. Камера состоит из смесительной головки и двух охлаждаемых водородом блоков корпуса. Первый блок (до степени расширения 7) имеет двухстенную оболочечную паяно-сварную конструкцию. Его внутренняя стенка из медного сплава содержит продольные фрезерованные каналы для прохода охладителя. Сопловой блок (до степени расширения 60) выполнен из спаянных между собой никелевых трубок с постоянным прямоугольным сечением.

Оба блока охлаждаются водородом, 95 % которого поступает в охлаждающий тракт первого блока, направляется к головке и в виде испаренного и нагретого газа через форсунки попадает в камеру. Небольшая часть газа перед смесительной головкой отбирается и используется в системе рулевых сопел крена и для надува бака горючего. Оставшиеся 5 % водорода направляются в трубки сопла, охлаждают его, нагреваются до температуры 900...950K и через открытые концы трубок выбрасываются в окружающее пространство, создавая дополнительную тягу.

Смесительная головка - литая, выполнена из стали. Она имеет три днища - плоское внутреннее, коническое среднее и полутороидальное наружное. К последнему с помощью конического переходника крепится узел карданного подвеса. Головка содержит 90 двухкомпонентных струйных коаксиальных форсунок типа "трубка в трубке", размещенных на пяти концентрических окружностях. Газообразный водород поступает в головку из тракта охлаждения корпуса и попадает в полость между средним и внутренним пористым днищами. Последнее выполнено из нескольких слоев спрессованной и спеченной стальной сетки. Большая часть водорода через кольцевые межтрубчатые щели в форсунках впрыскивается в камеру, а меньшая часть (около 10 %) "выпотевает", охлаждая внутреннее (огневое) днище. Жидкий кислород подводится через патрубок на наружном днище и поступает в камеру по внутренним трубкам форсунок. Крепление стальных трубок к огневому и среднему днищам осуществляется диффузионной пайкой.

ТНА двигателя - редукторный, с двумя параллельными валами. Он аналогичен ТНА американского ЖРД RL-10. Турбина - осевая двухступенчатая реактивная, с двумя лопаточными венцами на одном диске. Насос - шнекоцентробежный двухступенчатый, с осевым входом и двумя одинаковыми односторонними крыльчатками закрытого типа. На втором валу установлен одноступенчатый шнекоцентробежный насос кислорода с осевым входом и односторонней крыльчаткой закрытого типа. В конструкции насосов использованы алюминиевые сплавы. Валы, подшипники и шестерни редуктора стальные, большинство элементов турбины выполнено из жаростойких никелевых сплавов.

Питание ТНА обеспечивает охлаждаемый водородом двухкомпонентный газогенератор оболочечной паяно-сварной конструкции. Он вырабатывает восстановительный газ с температурой около 900K. Расход через газогенератор составляет около 1,8 % суммарного расхода топлива через двигатель. Отработавший на турбине газ поступает в теплообменник, где нагревает газообразный гелий для надува бака окислителя РН и управления автоматикой ЖРД, а затем выбрасывается через неподвижное сопло, создавая тягу около 0,7 кН. Запуск двигателя - одноступенчатый, пиростартерный. Газы пиростартера, работающего около 1 с, раскручивают ТНА и воспламеняют компоненты топлива в газогенераторе. Воспламенение в камере также пиротехническое. Тяга ЖРД регулируется с помощью пневмоуправляемого редуктора окислителя, установленного в магистрали газогенератора. Управление расходом топлива в двигателе нет. Выключение - двухступенчатое, сначала газогенератора (с помощью пневмоуправляемых пуско-отсечных клапанов), затем камеры (с помощью аналогичных клапанов).

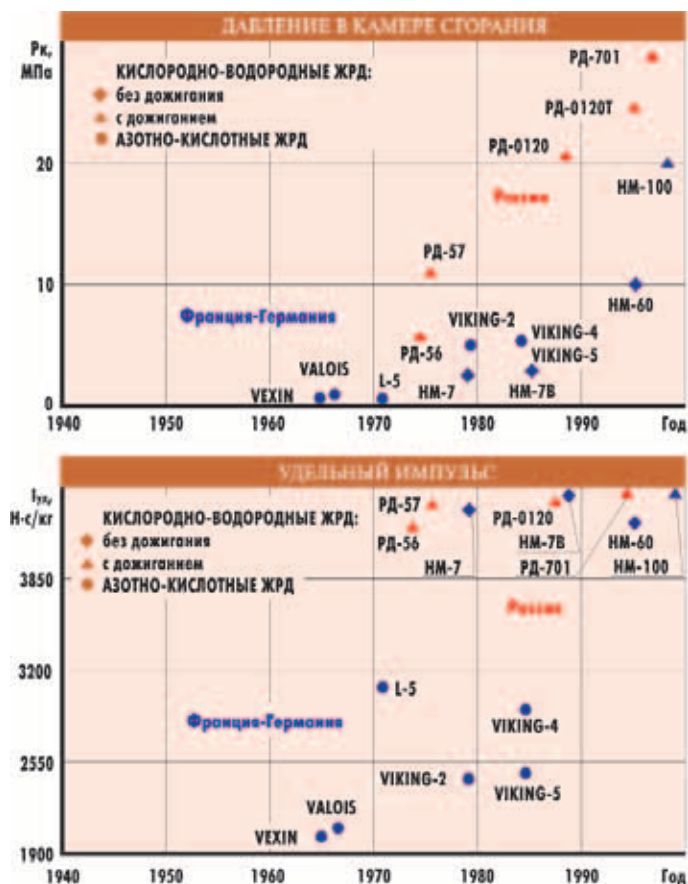
В 1988 г. для РН Ariane-4 был создан форсированный вариант данного ЖРД, получивший индекс НМ-7В. Он имеет увеличенное до 3,5 МПа давление в камере, большую степень расширения сопла, повышенную до 950K температуру в газогенераторе и ТНА увеличенной мощности. По экономичности данный вариант приближается к лучшим мировым образцам.

Вторым западноевропейским кислородно-водородным ЖРД, созданным концернами SEP и MBB, является мощный маршевый двигатель НМ-60 VULCAIN для первой ступени перспективной РН Ariane-5.

Однокамерный двигатель ЖРД НМ-60 открытой схемы имеет два автономных ТНА подачи кислорода и водорода (по типу американского ЖРД J-2). Оба ТНА приводятся во вращение восстанови-

### Характеристики западноевропейских кислородно-водородных ЖРД

Тип ЖРД	НМ-7	НМ-7В	НМ-60	НМ-100
Год создания	1979	1988	1995	1998
Фирма	SEP	SEP, MBB	SEP, MBB	SEP, MBB
Ракета-носитель	Ariane-1	Ariane-4	Ariane-5	Ariane-5
Тяга в пустоте, кН	60	63	1070	1220
Удельный импульс, Н·с/кг	4323	4442	4240	4450
Давление в камере, МПа	3,05	3,5	10	20
Расширение сопла	60	83	45	40
Мощность ТНА, кВт	420	485	3030(O <sub>2</sub> ), 11 900(H <sub>2</sub> )	14100(O <sub>2</sub> ), 35 200(H <sub>2</sub> )
Масса, кг	150	155	1450	1200
Время работы, с	545	725	500	550
Высота/диаметр, м	1,7/1,0	1,9/1,1	4,0/2,3	3,9/2,1



тельным газом, полученным в двухкомпонентном газогенераторе, работающем на основных компонентах топлива. При создании НМ-60 использованы многие решения, опробованные в двигателе НМ-7. Так, НМ-60 также установлен в карданном подвесе, обеспечивающем его отклонение в плоскостях тангажа и рыскания на углы до  $6^\circ$ , а управление по крену производится системой рулевых сопел на газообразном водороде, отбираемом после тракта охлаждения камеры.

Камера НМ-60 подобна камере НМ-7, хотя и работает при значительно большем давлении 10 МПа. Она состоит из трех узлов: блока литой смесительной головки с форсунками типа "трубка в трубке", блока двухстенного паяно-сварного корпуса (до степени расширения 5) и блока трубчатого сопла. Сопло охлаждается водородом, который затем сбрасывается в окружающее пространство. В отличие от НМ-7, в камере НМ-60 значительно увеличено число форсунок. Их 516 штук, причем 93 из них выдвинуты внутрь камеры и создают антипульсационные перегородки в виде кольца с пятью радиальными лучами (по аналогии с американским SSME). Форсунки периферийного ряда обеспечивают создание в камере пристеночного завесного слоя. Удельный тепловой поток в критическом сечении достигает  $60 \text{ МВт/м}^3$ , но максимальная температура внутренней стенки камеры в этом сечении не превышает  $680\text{K}$ .

Газогенератор НМ-60 двухзонный, с температурой в первой зоне около  $1500\text{K}$ , снижаемой затем до  $920\text{K}$  путем разбавления газа жидким водородом. Давление в газогенераторе 8 МПа, расход через него составляет около 3,5 % от суммарного расхода топлива через двигатель. Отработавший в ТНА газ выбрасывается через два неподвижных сопла, размещенных диаметрально противоположно около среза сопла камеры.

ТНА кислорода и водорода двигателя НМ-60 существенно отличаются по конструкции от соответствующих агрегатов НМ-7. Оба ТНА безредукторные. Первый из них - одновальный с одноступенчатой активной осевой турбиной и одноступенчатым шнекоцентробежным насосом кислорода. ТНА вращается с частотой около 70 об/с и обеспечивает на выходе давление кислорода 13,3 МПа. Подшипники ТНА кислорода - шариковые, сдвоенные. Их охлаждение и смазка производится перекачиваемым компонентом.

ТНА водорода - блочный двухвальный, с соосным расположением валов. На них расположены двухступенчатый шнекоцентробежный насос горючего и двухступенчатая активная осевая турбина. Насос имеет две односторонние крыльчатки закрытого типа. ТНА водорода вращается с частотой около 190 об/с и обеспечивает на выходе давление водорода около 16,4 МПа. В конструкции обоих ТНА широко применяются алюминевые, титановые и жаропрочные сплавы.

Запуск ЖРД НМ-60 одноступенчатый, с первоначальной раскруткой ТНА от порохового пиростартера. Зажигание в камере и газогенераторе - пиротехническое (средства электрического зажигания только разрабатываются). Регулирование тяги двигателя производится путем синхронного изменения подачи окислителя и горючего в газогенератор. Аппаратно оно осуществляется, наряду с пуском и отсечкой газогенератора, с помощью шаровых клапан-регуляторов. Одновременно для синхронизации опорожнения баков РН производится регулирование соотношения компонентов топлива с помощью газового дросселя, изменяющего распределение потоков газа между турбинами ТНА.

По своей конструкции ЖРД НМ-60 является современным кислородно-водородным ЖРД, обеспечивающим высокую надежность и значительный ресурс (до 7000 с при 20 включениях).

В 1998 г. концерны SEP и MBV приступили к разработке кислородно-водородного ЖРД НМ-100. Он имеет аналогичную американскому ЖРД SSME схему с дожиганием восстановительного водородного газа, который вырабатывается в двух одинаковых газогенераторах и обеспечивает привод двух автономных ТНА кислорода и водорода. ◀

Двигатель Vulcain ракеты-носителя Ariane 5

