

УДК 621.454.2.072

А. А. Прокопчук, канд. техн. наук В. А. Шульга, канд. техн. наук Е. В. Стрельченко,  
канд. техн. наук В. И. Конох, А. Н. Коваленко, А. В. Дибривный, А. В. Лапин, А. С. Кухта

## ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ БЛОКА МАРШЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ СТУПЕНИ AVUM РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ VEGA

Украинские предприятия ГП «КБ «Южное» и ГП ПО ЮМЗ обеспечивают поставки блока маршевого двигателя VG143 для верхней ступени AVUM PH Vega, который представляет собой однокамерный ЖРД с тягой ~250 кгс, обеспечивающий пятикратное включение в полете. В настоящее время проведено 11 успешных запусков PH Vega. В процессе летной эксплуатации замечаний к работе двигателей не было. Данный ЖРД обладает сочетанием привлекательных характеристик, таких как высокий удельный импульс, малая масса, возможность многократного включения в полете, высокая надежность, подтвержденная хорошими результатами летных испытаний двигателей-прототипов. Резерв этого двигателя с точки зрения дальнейшей модернизации далеко не исчерпан. Расширение возможностей по выведению ракетами-носителями полезной нагрузки на различные орбиты искусственных спутников Земли является основной задачей как для разработчиков РКН в целом, так и для разработчиков отдельных узлов и систем, таких как ЖРД, входящих в их состав. С учетом опыта отработки двигателей-прототипов следует отметить следующие пути модернизации блоков маршевого двигателя:

- повышение удельного импульса за счет увеличения степени расширения сопла;
- уменьшение объемов внутренних полостей и массы камеры;
- увеличение времени работы;
- увеличение количества включений;
- увеличение продолжительности пауз между включениями и времени функционирования на орбите.

Увеличение тяги и удельного импульса блока маршевого двигателя VG143 и ступени AVUM PH Vega происходит за счет использования пневмонасосной системы подачи топлива вместо штатной вытеснительной. Также приведены информация о двигателях-прототипах РД859, РД864, РД866 и РД869 и данные об их основных характеристиках, отработке и эксплуатации, которые представляют интерес для специалистов по разработке ЖРД и РН.

**Ключевые слова:** блок маршевого двигателя, жидкостный ракетный двигатель, пути модернизации, камера двигателя.

Українські підприємства ДП «КБ «Південне» та ДП ВО ПМЗ забезпечують постачання блока маршевого двигуна VG143 для верхнього ступеня AVUM PH Vega, який являє собою однокамерний РРД з тягою ~250 кгс і забезпечує п'ятиразове увімкнення в польоті. На цей час проведено 11 вдалих пусків PH Vega. У процесі льотної експлуатації зауважень щодо роботи двигунів не було. Цей РРД поєднує у собі привабливі характеристики, такі як високе значення питомого імпульсу, мала маса, можливість багаторазового увімкнення у польоті, висока надійність, підтверджена непоганими результатами льотних випробувань двигунів-прототипів. Резерв цього двигуна з погляду подальшої модернізації ще не вичерпано. Розширення можливостей для виведення ракетами-носіями корисного навантаження на різні орбіти штучних супутників Землі є основним завданням як розробників РКП у цілому, так і для розробників окремих вузлів та агрегатів, таких як РРД, що входять до їх складу. З урахуванням досвіду відпрацювання двигунів-прототипів слід зазначити такі шляхи модернізації блоків маршевого двигуна:

- підвищення питомого імпульсу за рахунок збільшення ступеня розширення сопла;
- зменшення об'ємів внутрішніх порожнин та маси камери;
- збільшення часу роботи;
- збільшення кількості увімкнень;
- збільшення тривалості пауз між увімкненнями та часу функціонування на орбіті.

Збільшення тяги і питомого імпульсу блока маршевого двигуна VG143 та ступеня AVUM PH Vega відбувається за рахунок використання пневмонасосної системи подачі палива замість штатної витіснювальної. Також наведено інформацію про двигуни-прототипи РД859, РД864, РД866 та РД869 і дані про їх основні характеристики, відпрацювання та експлуатацію, які будуть цікаві для фахівців з розроблення РРД та РН.

**Ключові слова:** блок маршевого двигуна, рідинний ракетний двигун, шляхи модернізації, камера двигуна.

The Ukrainian companies Yuzhnoye SDO and SE PA YMZ supply VG143 main engine assembly for Vega LV AVUM upper stage, which is a one-chamber LRE of 250 kg thrust with five ignitions in flight. By the present, 11 successful launches of Vega LV have been made. In the process of flight operation, there were no critical comments on engines operation. This LRE has a combination of attractive characteristics, such as high specific pulse, low mass, multiple ignitions in flight, high reliability confirmed by good results of flight test of the prototype engines. The reserve of this engine from the viewpoint of further modernization is far from being exhausted. Enhancing the capabilities of payload injection by launch vehicles into various orbits of artificial Earth satellites is the main task for the developers of ILV as a whole and for the developers of separate assemblies and systems, such as LRE being part of ILV. With consideration for the experience of prototype engines testing, we should note the following ways of main engine assembly modernization:

- increasing the specific pulse due to the increase of nozzle expansion ratio;
- decreasing the volume of internal manifolds and mass of chamber;
- increasing the operation time;
- increasing the ignitions number;
- increasing the duration of pauses between ignitions and orbital functioning time.

Increasing the thrust and specific pulse of Vega LV VG143 main engine assembly and AVUM stage takes place due to the use of pneumopump propellant feeding system instead of standard pressure feeding. Besides, the information is presented on RD859, RD864, RD866 and RD869 prototype engines, the data on their basic characteristics, testing and operation. The below information is of interest to LRE and LV developers.

**Key words:** main engine assembly, liquid rocket engine, ways of modernization, engine chamber.

## Введение

Блок маршевого двигателя (БМД) VG143 разработан на базе камеры серийного двигателя РД869 с минимальными конструктивными изменениями. Одним из таких изменений была перенастройка расходов через пояса завес для обеспечения необходимого удельного импульса тяги. На рис. 1 представлен общий вид БМД VG143.

БМД выполнен однокамерным, однорежимным, многократного включения, с вытеснительной системой подачи самовоспламеняющихся компонентов топлива в камеру двигателя. Управление вектором тяги осуществляется поворотом камеры двигателя в карданном подвесе в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.



Рис. 1. БМД VG143

Основные характеристики БМД приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики БМД VG143

Параметр, размерность	Значение
Компоненты топлива	АТ+НДМГ
Тяга в пустоте, кгс	250±5%
Удельный импульс тяги в пустоте, с	315,5±3*
Соотношение компонентов топлива	2±1,4%
Давление в камере сгорания, кгс/см <sup>2</sup>	20,4
Давление на срезе сопла, кгс/см <sup>2</sup>	0,011
Число включений	5
Время работы двигателя, с	~ 700
Время пауз между включениями, с	2650
Угол качания камеры, угл. град	± 10
Масса, кг	16,6**

\*По статистике контрольно-технологических огневых испытаний достигнуто среднее значение удельного импульса 316,6 с.

\*\*Без учета массы плиты и приводов качания.

### Пути модернизации БМД

Расширение возможностей по выведению РН полезной нагрузки на различные орбиты искусственных спутников Земли (ИСЗ) является основной задачей как разработчиков РКН в целом, так и разработчиков отдельных узлов и систем, входящих в их состав, таких как ЖРД.

С учетом опыта отработки двигателей-прототипов следует отметить следующие пути модернизации БМД:

- повышение удельного импульса за счет увеличения степени расширения сопла;
- уменьшение объемов внутренних полостей и массы камеры;
- увеличение времени работы;
- увеличение количества включений;
- увеличение продолжительности пауз между включениями и времени функционирования на орбите.

Возможности повышения тяги и удельного импульса БМД VG143 и ступени AVUM РН Vega за счет применения насосной системы подачи были описаны в [1, 2].

### Увеличение степени расширения сопла

Увеличение степени расширения сопла – один из широко применяемых способов повышения удельного импульса тяги. За счет повышения геометрической степени расширения сопла со 102 (камера БМД) до 154 или 200 можно увеличить удельный импульс тяги на 1,7 и 2,5 с соответственно. На окончательный выбор степени расширения сопла оказывают большое влияние компоновочные и эксплуатационные факторы: допустимые осевые или радиальные габариты, масса, возможность проведения огневых контрольно-технологических стендовых испытаний для получения характеристик при безотрывном истечении газов в сопле.

### Уменьшение объемов внутренних полостей и массы камеры

С помощью экспериментальных исследований, выполненных КБ «Южное» на опытной конструкции камеры, доказана возможность уменьшения объемов внутренних полостей и массы камеры БМД в основном за счет

замены секции сопла, охлаждаемой окислителем, насадком радиационного охлаждения. Камера БМД, как и ее прототипы, имеет радиационно-охлаждаемую секцию сопла, изготовленную из хромоникелевого сплава ХН60ВТ. Остальная часть внутренней стенки охлаждается регенеративно двумя компонентами топлива (рис. 2). Ниобиевые сплавы с покрытием из дисилицида молибдена работоспособны при температурах 1300-1400°С, в то время как максимальная рабочая температура применяемого в камере БМД сплава ХН60ВТ составляет 1100°С. Теоретически применение ниобиевого сплава позволяет исключить секцию сопла, охлаждаемую окислителем.

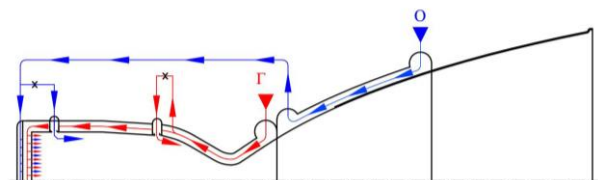


Рис. 2. Схема охлаждения камеры БМД и ее прототипов

Опытная конструкция выполнена на базе камеры двигателя РД866, которую, как и камеру двигателя РД869, можно рассматривать в качестве прототипа камеры БМД. Доработка опытной камеры заключалась в замене двух секций сопла (секция окислителя и радиационно-охлаждаемый насадок) на одну радиационно-охлаждаемую, изготовленную из ниобиевого сплава (Н65В2МЦ-М – переходник и ВН2АЭ – сопло) с теплозащитным покрытием. При огневых испытаниях (ОИ) выполняли оценку работоспособности материала соплового насадка и сравнительную проверку двух вариантов стыковки насадка с регенеративно-охлаждаемым корпусом: резьбо-сварного и паяного соединения. В резьбо-сварном варианте конструкции (рис. 3) стыковку стального корпуса камеры и соплового насадка выполняют при помощи резьбового соединения. Для фиксации и герметизации резьбового соединения стальную кромку оплавливают на фаску в ниобиевом сопле при помощи сварки электронным лучом в вакууме.

В паяном варианте соединения применено стальное переходное кольцо, которое по конической поверхности при помощи пайки соединяли с ниобиевым соплом и при помощи сварки – со стальным корпусом камеры. При отработке паяного соединения варьировались марка припоя, материал переходного кольца и режимы пайки. Соединяли стальной корпус и переходное кольцо соплового насадка при помощи импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом без присадка.

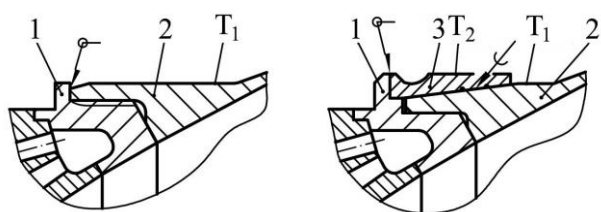


Рис. 3. Конструкция соединения соплового насадка с охлаждаемым корпусом камеры:

- 1 – регенеративно-охлаждаемая секция сопла;
- 2 – радиационно-охлаждаемый сопловой насадок;
- 3 – переходное кольцо;  $T_1$  – температура насадка вблизи места крепления к камере;  $T_2$  – температура переходного кольца

Результаты ОИ подтвердили работоспособность соплового насадка из ниобиевого сплава с покрытием из дисилицида молибдена, а также работоспособность вариантов стыковки насадка к охлаждаемой секции сопла. Максимальная замеренная температура соплового насадка не превышала  $1315^{\circ}\text{C}$ , что допустимо для штатного покрытия из дисилицида молибдена и гарантированно позволяет обеспечить заданный ресурс камеры БМД. Необходимо также отметить, что ОИ опытной камеры проводились в заведомо более теплонпряженных режимах, чем это имеет место в БМД.

Для количественной оценки потенциальных возможностей уменьшения массы камеры и объемов внутренних полостей был разработан проект модифицированной камеры БМД+ (рис. 4), в конструкции которой учтены положительные результаты испытаний ниобиевого соплового насадка.

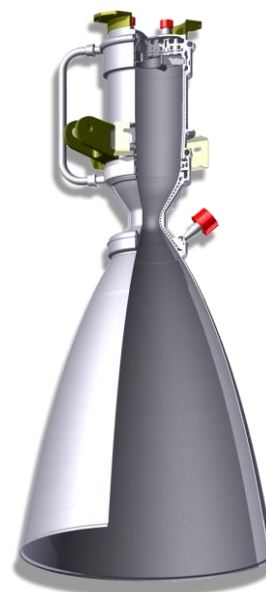


Рис. 4. Облик модифицированной камеры БМД+

Применение ниобиевого соплового насадка позволило исключить секцию окислителя на сверхзвуковом участке сопла, уменьшить диаметр стыка радиационно-охлаждаемого соплового насадка с охлаждаемым корпусом камеры, исключить перекрывной клапан окислителя (из-за уменьшения объема полостей окислителя), снизить подогрев горючего за счет охлаждения цилиндрического участка окислителем. Схема охлаждения БМД+ представлена на рис. 5.

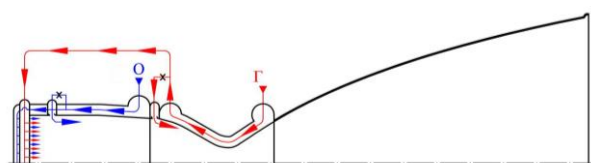


Рис. 5. Схема охлаждения модифицированной камеры БМД+

Расчет массы камеры БМД+ показал, что при сохранении степени расширения сопла масса камеры может быть снижена с 9,4 до 6 кг.

Анализ объемов заливки (табл. 2) показывает, что в новой конструкции существенно уменьшены объемы внутренних полостей (от входных клапанов до огневого пространства): по тракту окислителя на  $0,2765 \text{ дм}^3$  и по тракту горючего на  $0,044 \text{ дм}^3$ . При программе полета с пятью включениями указанные изменения приводят к уменьшению выбросов топлива на 2,12 кг.

Таблица 2

## Объемы заливки камер БМД и БМД+

Конфигурация	Тракт	Суммарный объем, л
БМД	Окислитель	0,387
	Горючее	0,139
БМД+	Окислитель	0,1104
	Горючее	0,094

Более подробно данный подход к модернизации изложен в [4].

### Увеличение времени работы, количества включений, продолжительности пауз между включениями и времени функционирования на орбите

Увеличение времени работы двигателя хотя и менее эффективно в сравнении с повышением тяги ввиду гравитационных потерь, но не потребует столь радикальных изменений конструкции двигателя, а объем отработки может быть ограничен проведением серий квалификационных ОИ существующего двигателя на заданное время работы.

Увеличение пауз между включениями и времени функционирования двигателя на орбите позволит дополнительно расширить возможности по выведению полезной нагрузки на различные орбиты ИСЗ. Основной технической сложностью в данном вопросе является вероятность значительного снижения или повышения температуры камеры БМД, в особенности принимая во внимание наличие охлаждения обоими компонентами топлива и достаточно высокую температуру замерзания азотного тетроксид.

Другим немаловажным фактором является повышение количества включений БМД, что позволит увеличить количество объектов, выводимых на различные орбиты в ходе одного пуска РН. Данная задача становится все более актуальной, если учесть непрерывное развитие технологии миниатюризации спутников и получающие все большую популярность кубсаты.

Стоит отметить, что БМД VG143 имеет достаточно высокий резерв с точки зрения

дальнейшей модернизации, обоснованный режимами и историей эксплуатации двигателей-прототипов, а также результатами испытаний конструкторских моделей самого БМД.

### Отработка и эксплуатация БМД VG143

Квалификационные испытания БМД (с учетом выполненного по запросу заказчика комплекса дополнительных испытаний сверх запланированного в рамках квалификации объема) проведены на двух экземплярах двигателя, один из которых прошел 13 испытаний (35 включений с наработкой ~3980 с), а второй – 30 испытаний (74 включения с наработкой ~3008 с). После этого камеры остались работоспособны и готовы к проведению дальнейших ОИ. Кроме этого, испытаны две отработочные модели двигателя с суммарной наработкой 2696 с при 35 включениях. Один из указанных двигателей после доработки (была обрезана неохлаждаемая часть сопла) был испытан совместно со штатной системой подачи в составе двигательной установки на стенде компании Asrtrium (Германия), где наработал суммарно 482 с при 34 включениях. На этапе отработки двигатель VG143 подтвердил надежность и работоспособность при всех сочетаниях условий работы, предусмотренных техническим заданием.

Исходя из полученной в ходе отработки БМД статистики, представляется возможным значительное увеличение количества включений БМД. Принимая во внимание тот факт, что наработка вышеуказанных времени работы и количества включений в процессе квалификационных испытаний была получена в ходе нескольких ОИ, для подтверждения возможности их увеличения потребуется проведение дополнительного цикла испытаний не менее чем на одном экземпляре БМД. В ходе этих испытаний также может быть проверена работоспособность БМД при увеличенной продолжительности пауз между включениями, если такие требования к двигателю будут предъявлены.

Двигатели-прототипы

Таблица 3

Критическим элементом с точки зрения обеспечения времени работы БМД является камера двигателя как наиболее сложный и теплонапряженный элемент конструкции. При этом предварительная оценка прогнозируемого ресурса работы камеры двигателя может быть выполнена исходя из имеющейся наработки и режимов работы конструктивно близких двигателей-прототипов.

Различные прототипы камеры БМД VG143 длительное время применялись в других двигателях разработки ГП «КБ «Южное», в которых использовалась турбонасосная и пневмонасосная системы подачи компонентов топлива [3]. Первым прототипом камеры БМД VG143 была камера резервного двигателя РД859 блока двигателей лунного взлетно-посадочного модуля (блок Е). Высоканадежный блок двигателей (основного и резервного), разработанный в конце 60-х годов прошлого века для ракетного комплекса Н-1, предназначался для осуществления мягкой посадки на поверхность Луны, взлета с ее поверхности и выведения лунного корабля на окололунную орбиту.

В состав блока двигателей, представленного на рис. 6, входят:

- основной двигатель РД858;
- резервный двигатель РД859.

Каждый двигатель обеспечивал двукратное включение.

Характеристики двигателей РД858 и РД859 приведены в табл. 3.



Рис. 6. Блок двигателей лунного взлетно-посадочного модуля блока Е

Основные характеристики двигателей РД858 и РД859 лунного взлетно-посадочного модуля блока Е

Параметр, размерность	РД858	РД859
Тяга, кгс	$\frac{2050}{858}^*$	2045
Удельный импульс тяги, с	$\frac{315}{285}^*$	312
Давление в камере сгорания, кгс/см <sup>2</sup>	$\frac{80}{33,8}^*$	80
Давление на срезе сопла, кгс/см <sup>2</sup>	$\frac{0,05}{0,021}^*$	0,05
Соотношение компонентов топлива	$\frac{2,03}{1,6}^*$	2,0
Время работы, с: - согласно ТЗ - максимальное при ОИ	470** 3600	403 3600
Количество включений / переключений	2	2
Габариты, высота/длина, мм	890/420	890/302
Масса двигателя, кг	53	57

\*Числитель – основной режим, знаменатель – режим дросселирования.

\*\*До 100 с на режиме глубокого дросселирования.

РД859 также интересен тем, что в ходе его отработки проводились проливочные и огневые испытания камер двигателя с целью определения его работоспособности в условиях широкого диапазона температур сопла, к примеру проверка запуска двигателя при следующих сочетаниях температур компонентов топлива и камер сгорания:

- с охлажденными до -5°С компонентами топлива и охлажденным до -150°С участком сопла;
- с нагретыми до 45±5°С компонентами топлива и нагретым до 150°С участком сопла.

Данные испытания показали устойчивую работу камеры при всех сочетаниях температур компонентов топлива. Тем не менее стоит принимать во внимание отличия в

конфигурации трактов охлаждения камеры двигателя РД859 от VG143, отличающиеся систему подачи и динамику запуска. Эти факторы не дают возможности напрямую экстраполировать результаты испытаний, проведенных по РД859, на камеру VG143, хотя и позволяют с оптимизмом говорить о самой возможности повышения диапазона рабочих температур конструкции камеры VG143 при условии их подтверждения в ходе соответствующих испытаний.

Следующим этапом эволюции данной камеры стало создание четырехкамерных маршевых двигателей РД864 и РД869, предназначенных для создания тяги и управления по всем каналам стабилизации. Характеристики данных двигателей приведены в табл. 4, а облик – на рис. 7.

Таблица 4

Основные характеристики двигателей РД864 и РД869

Параметр, размерность	РД864 (камера)	РД869 (камера)
Тяга, кгс	$\frac{2060}{862} (\frac{504}{208})^*$	$\frac{2087}{875} (\frac{515}{211})^*$
Удельный импульс тяги, с	$\frac{309}{298} (\frac{314}{305,5})^*$	$\frac{313}{302,3} (\frac{319,5}{312,5})^*$
Давление в камере сгорания, кгс/см <sup>2</sup>	$\frac{41,8}{17,3}^*$	
Давление на срезе сопла, кгс/см <sup>2</sup>	0,023	
Соотношение компонентов топлива	$1,8 (\frac{1,92}{2})^*$	
Время работы, с: – согласно ТЗ	600	700
– максимальное при ОИ	3000	3000
Количество включений / переключений	25	50
Габариты (включая отсек), высота/длина, мм	1420/4020	
Масса двигателя, кг	199	196

\*Числитель – основной режим, знаменатель – режим дросселирования.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к двигателю РД864, камера должна была работать на двух режимах – основном (ОР) и дросселированном (ДР) с возможностью многократного переключения с одного режима на другой.

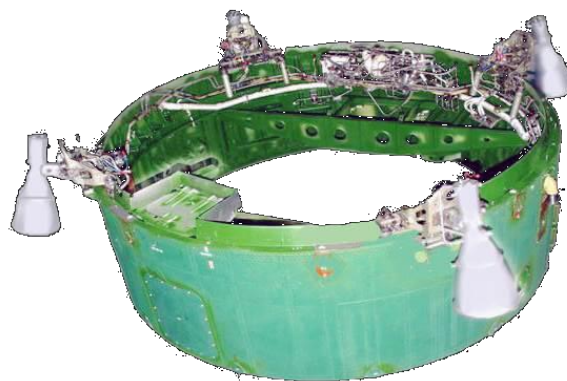


Рис. 7. Маршевые двигатели РД864 и РД869

Работа камеры на двух режимах, с дросселированием тяги в 2,5 раза, обуславливает определенные особенности конструкции и выбор основных параметров. Поэтому для решения данной задачи по камере РД864 был использован опыт создания двигателей РД858 и РД859, отличающихся высоким совершенством конструкции и параметров. В частности, была полностью сохранена геометрия внутреннего контура камеры двигателя РД859, заимствованы основные конструктивные решения по смесительной головке и корпусу камеры. Кроме того, для обеспечения двухрежимной работы камеры, высокой экономичности и устойчивости рабочего процесса и надежного охлаждения в ней принят ряд новых схемных и конструктивных решений:

- внутреннее охлаждение корпуса камеры организовано с помощью двух разнокомпонентных поясов завес: завесы окислителя, расположенной вблизи смесительной головки, и завесы горючего, расположенной на начальном участке дозвукового сопла;

- часть сверхзвукового регенеративно охлаждаемого участка сопла заменена сопловым насадком радиационного охлаждения.

При создании РД869 была произведена модернизация камеры двигателя в части

оптимизации тракта регенеративного охлаждения и расходов компонентов топлива через пояса завес внутреннего охлаждения корпуса камеры.

В результате этих мероприятий была уменьшена масса камеры двигателя на 1 кг (11%) и увеличен удельный импульс ее тяги в пустоте на ОР на 5,5 и на ДР на 7 с.

Камера, используемая в составе БМД VG143, также была дополнительно модернизирована в сравнении с РД869 в части оптимизации расходов компонентов топлива через пояса завес внутреннего охлаждения корпуса камеры исходя из требований, предъявляемых к режимам работы БМД. Тем не менее можно говорить о том, что основные конструкторские решения касательно смесеобразования, охлаждения и газодинамического профиля камеры в большинстве своем остались неизменны либо близки к используемым в РД869.

Эволюция камеры, установленной на БМД VG143, представлена на рис. 8.

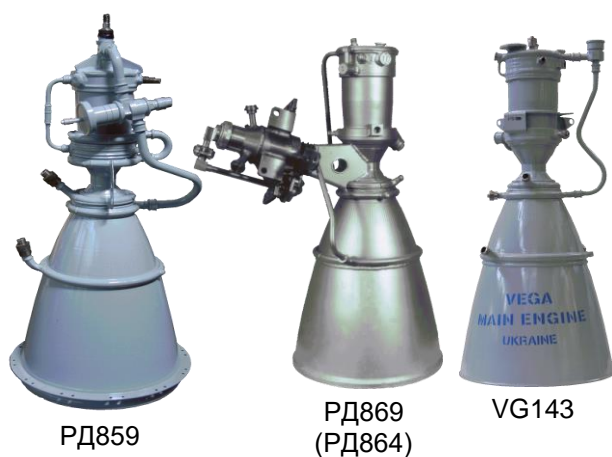


Рис. 8. Эволюция камеры, установленной на БМД VG143

Несмотря на то, что камеры двигателей РД859, РД864, РД869 и РД866 имеют ряд общих конструктивных особенностей с камерой VG143, различия по характеристикам, конструкции охлаждающих трактов и настройке завес (которые в совокупности оказывают влияние на процессы охлаждения, смесеобразования и динамику запуска и останова двигателя) не дают возможности строить прямые аналогии и экстраполировать характеристики, полученные для их

камер, на камеру БМД VG143. Также стоит отметить, что суммарная наработка на одной камере для вышеперечисленных двигателей не превышает наработку на камере БМД VG143: 3600 с для камеры РД859 (являющейся достаточно далеким аналогом VG143) и 3000 с для камер РД864 и РД869.

С другой стороны, все эти двигатели отличались от БМД VG143 более напряженными в части температур и давлений условиями работы камер, что в большинстве случаев отрицательно сказывается на ресурсе работы. Следовательно, можно предположить, что БМД VG143 может обеспечить и более продолжительное (вплоть до ~3000 с) время работы, но его фактическое значение должно быть подтверждено только в ходе соответствующих огневых испытаний.

Говоря об увеличении количества включений БМД VG143, необходимо отметить, что максимальные ресурсы по количеству включений на одном экземпляре БМД (35 и 74) достигались в ходе нескольких комплексов испытаний. При этом между испытаниями двигатель подвергался технологической обработке и различным проверкам, ввиду чего данная статистика не позволяет с уверенностью говорить о достижимости подобного количества включений в ходе одного ОИ. С другой стороны, существующая статистика по двигателям РД864 (25 включений в полете) и РД869 (50 включений в полете) говорит о принципиальной возможности обеспечения на камере БМД VG143 до 25-30 включений в полете. Но стоит также принимать во внимание, что в составе БМД для подачи и отсечки подачи компонентов топлива в камеру двигателя применены электрогидроклапаны новой конструкции, которые ранее не применялись в двигателях-прототипах.

## Выводы

1. Блок маршевого двигателя VG143 ступени AVUM РН Vega выполнен на базе камеры сгорания, различные модификации которой были использованы в составе целого ряда двигателей-прототипов, успешно эксплуатировавшихся в составе РН различного назначения.



2. Существует возможность значительного улучшения энергетических и массовых характеристик БМД за счет модернизации камеры двигателя. Удельный импульс тяги камеры БМД может быть увеличен на 8-10 с за счет комплексной оптимизации: смесеобразования, параметров внутреннего завесного охлаждения, массового соотношения компонентов топлива, увеличения степени расширения сопла.

Модернизация конструкции в основном за счет применения соплового насадка радиационного охлаждения из ниобиевого сплава взамен применяемого в настоящее время соплового насадка из хромоникелевого сплава ХН60ВТ позволяет:

– существенно уменьшить объем внутренних полостей камеры двигателя и, как следствие, снизить выбросы компонентов топлива при останове двигателя на 2,12 кг (при штатных пяти включениях);

– уменьшить массу конструкции камеры с 9,4 до 6 кг.

Такая модернизация позволит существенно увеличить эффективность БМД, но потребует проведения значительного объема экспериментальной отработки.

3. Имеющаяся на сегодняшний день экспериментальная наработка по БМД VG143, а также статистика по двигателям-прототипам, имевшим более жесткие требования к условиям работы, позволяют предполагать возможность повышения количества включений двигателя до 25-30, времени его суммарной работы до ~3000 с, а также расширения диапазона рабочих температур конструкции камеры двигателя, что позволит увеличить продолжительность функционирования на орбите и пауз между включениями.

4. Для проверки и подтверждения работоспособности БМД VG143 при увеличенном времени работы, количестве включений и продолжительности пауз между включениями необходимо проведение комплекса стендовых испытаний. Объем необходимой экспериментальной отработки будет напрямую зависеть от новых требований, предъявляемых к двигателю заказчиком.

5. Существенное повышение энерго-массовых характеристик БМД может быть достигнуто за счет введения в его состав насосной системы подачи и/или существенной модернизации камеры. Но такая модернизация потребует проведения большего объема экспериментальной отработки, целесообразность которой будет определяться периодом окупаемости затраченных на проведение испытаний средств.

#### Список использованной литературы

1. Shnyakin V., Shul'ga V., Zhivotov A., Dibivny A. Creating a new generation of space-craft liquid rocket engines basing on pneumopump propellant supply systems / Space Propulsion: International Conference. – France, Bordeaux. – 2012.

2. Shul'ga V. Development status and improvement methods for upper stage engines of Vega and Cyclone launch vehicles / Space Propulsion; International Conference. – Germany, Cologne. – 2014.

3. De Rose L., Parmigiani P., Shnyakin V., Shulga V., Pereverzyev V., Caramelli F. Main engine of the Vega fourth stage: characteristics and heritage / 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion". – Netherlands, Noordwijk. – 2018.

4. Коваленко А. Н., Переверзев В. Г., Марчан Р. А., Блишун Ю. В. Экспериментальное подтверждение возможности улучшения энерго-массовых характеристик ЖРД для верхней ступени ракеты носителя «Вега»: Докл. междунар. науч.-техн. конф. СГАУ им. С. П. Королева. – 2014.

Статья поступила 14.08.2018