

ВНЕДРЕНИЕ СОПЛОВОГО НАСАДКА РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА КАМЕРУ МАРШЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ 11Д58М РАЗГОННОГО БЛОКА ДМ-SL

© 2006 А.В. Межевов, В.И. Скоромнов, А.В. Козлов, Н.Н. Тупицын, В.Г. Хаспеков

РКК «Энергия», г. Королёв Московской обл.

В РКК «Энергия» совместно с НПО «Искра» и Центром Келдыша разработан и внедрен на маршевом двигателе 11Д58М модернизированный сопловой насадок радиационного охлаждения из углерод-углеродного композиционного материала. За счёт повышения геометрической степени расширения сопла удельный импульс тяги двигателя был увеличен на 4 с, что эквивалентно увеличению на 90 кг массы полезной нагрузки, выводимой на геостационарную орбиту.

РКК «Энергия» совместно с НПО «Искра» и Центром Келдыша разработала и применила на маршевом двигателе 11Д58М модернизированный сопловой насадок радиационного охлаждения (НРО-М) из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). Впервые в нашей стране на серийном ЖРД был использован материал, традиционно применяемый в соплах РДТТ. За счёт повышения геометрической степени расширения сопла удельный импульс тяги двигателя был увеличен на 4 с, что эквивалентно увеличению на 90 кг массы полезной нагрузки, выводимой на геостационарную орбиту (с учетом увеличения массы насадка на 10 кг). Основные характеристики ЖРД 11Д58М приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики ЖРД 11Д58М

Компоненты топлива: Горючее Окислитель	РГ-1 O ₂ ^ж
Тяга, кН	85
Удельный импульс тяги, с	356
Давление в камере, МПа	7,9
Соотношение компонентов топлива	2,82
Геометрическая степень расширения сопла	280
Множественность включений	7
Суммарное время работы, с	1200

На рис. 1 представлены насадки, применяемые на двигателе 11Д58М. Геометрическая степень расширения сопла с НРО-М равна 280, его длина увеличилась на 450 мм по сравнению с исходным размером НРО.

Сложность создания НРО-М определялась следующими обстоятельствами:

- Условия работы насадков в ЖРД намного более жесткие, чем в РДТТ. Это

подтверждает сравнение основных технических требований к насадкам для РДТТ и ЖРД типа 11Д58М, приведенных в таблице 2.

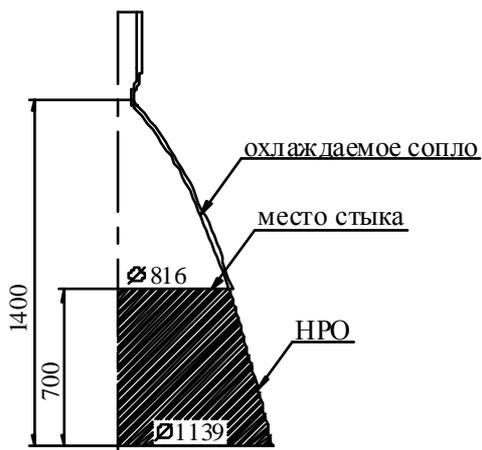
Таблица 2. Основные технические требования к насадкам для РДТТ и ЖРД типа 11Д58

Технические требования	РДТТ	ЖРД
Время работы двигателя, с	≤ 90	1200
Количество включений, п	1	5
Окислительный потенциал продуктов сгорания	0,06	0,28
Начальная температура конструкции, °С	0...30	-160...200

Такие отличия потребовали проведения большого объема работ по экспериментальному подтверждению работоспособности НРО-М в составе двигателя 11Д58М.

Огневые испытания полноразмерного НРО-М, обеспечивающего увеличение геометрической степени расширения сопла $f_a = F_a/F_{кр}$ с 94 до 280, возможны только в условиях баростенда, аналогичных условиям испытательного комплекса J-4 Центра Арнольда, США. В России подобного стенда нет. Существующий в РКК «Энергия» испытательный стенд позволяет испытывать двигатели до $f_a = 140$. Это соответствует длине соплового насадка не более 300 мм. РКК «Энергия» имеет положительный опыт испытаний коротких насадков и методику переноса результатов испытаний на натурные, подтвержденную летными испытаниями для металлических насадков. Необходимо было имеющуюся методику усовершенствовать и распространить на полноразмерные НРО-М с учетом результатов испытаний укороченных насадков из УУКМ и опыта НПО «Искра» и Центра Келдыша по отработке РДТТ.

Существующий НРО



НРО-М из УУКМ

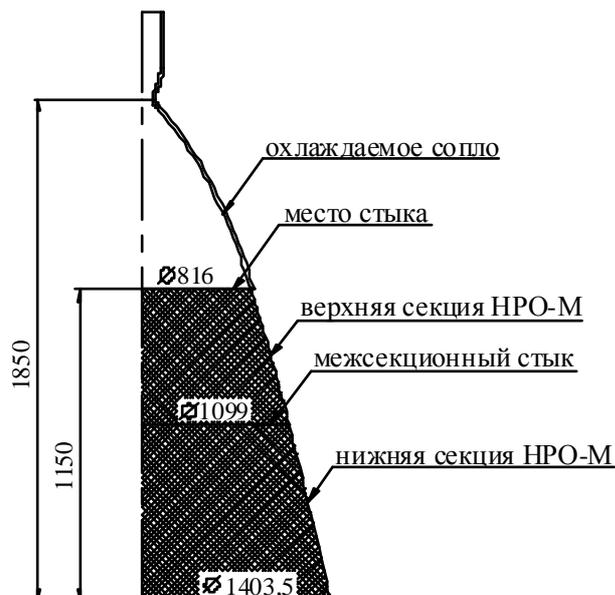


Рис. 1. Сопловые насадки двигателя 11Д58М

- К началу работы не было достоверных сведений по стойкости углеродных материалов в среде продуктов сгорания ЖРД при температуре до 1250°C. Имевшиеся в Центре Келдыша данные по химической стойкости УУКМ, полученные на модельных двигателях, не давали однозначного ответа о величине и скорости уноса материала в процессе работы двигателя, о необходимости применения защитных покрытий насадка или создания завесного охлаждения средствами двигателя. Не имелось также проверенных технических решений по конструкции стыка насадков с охлаждаемым соплом, а также стыка между секциями насадка.

- НРО-М разрабатывался для двигателя 11Д58М, который используется в различных космических программах, имеет высокую надежность и большую положительную статистику летных испытаний. Внедрение нового насадка не должно было снизить достигнутую надежность двигателя.

Для исключения ошибок, связанных с переносом результатов испытаний и исследований модельных образцов на полноразмерные насадки, огневые испытания коротких образцов насадков проводились только на штатных двигателях со штатным креплением насадков к соплу. Кроме того, короткие насадки изготавливались по принятому на серийном производстве технологическому

процессу из материалов, соответствующих требованиям технической документации.

Последние два мероприятия резко сократили сроки внедрения насадка в конструкцию двигателя, сняв большинство вопросов по переносу условий и результатов испытаний модельных двигателей и образцов на натурные. Огневые испытания коротких насадков в составе штатного двигателя дали ответы и на все другие вопросы, связанные с тепловым состоянием насадка, термоэрозийной стойкостью материала и напряжено-деформированным состоянием конструкции.

Анализ теплового состояния и термоэрозийного уноса НРО-М

Расчетно-теоретическая оценка теплового состояния НРО-М (рис. 2) проведена Центром Келдыша и НПО «Искра» по исходным данным РКК «Энергия» по современным методикам и хорошо совпадает с имевшимися экспериментальными результатами для металлических и полученным вновь для укороченных насадков из УУКМ.

Что касается термоэрозийного уноса, то его величина по предварительной оценке колебалась от десятков микрон до нескольких миллиметров. И только проведя испытания укороченных насадков НРО-М в составе нескольких двигателей, была определена за-

зависимость линейного износа УУКМ от температуры и длительности работы.

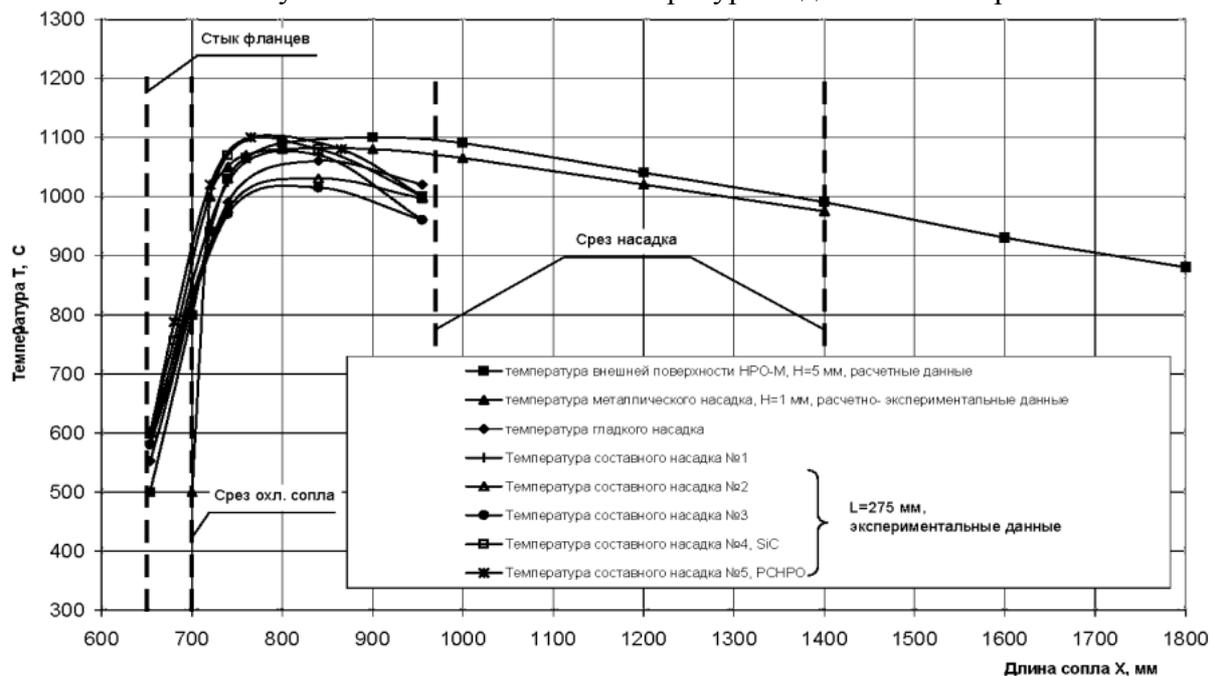


Рис. 2. Тепловое состояние сопловых насадков

Было испытано шесть образцов укороченных насадков из УУКМ длиной 275 мм. Все испытания в РКК «Энергия» прошли ус-

пешно, без замечаний и отклонений, влияющих на их работоспособность. Данные стендовых испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Данные стендовых испытаний

№ МД	№	Время испытания, с	$P_{к\gamma}$, кгс/см ²	K_m	$T, ^\circ C$	Конструкция насадка
124	1	660	74,1	2,469	1040	гладкий L=275 мм, №1
124	2	300	81,0	2,475	1040	
153	3	300	74,0	2,569	1060	
		$\Sigma=1260$				
153	4	164	74,7	2,470	938	составной L=275 мм, №2
153	5	750	74,2	2,478	1060	
153	6	300	74,7	2,470	962	
153	7	275	74,2	2,574	965	
		$\Sigma=1489$				
153	8	750	73,1	2,421	1030	составной L=275 мм, №3
153	9	300	73,7	2,468	983	
153	10	300	73,7	2,473	970	
		$\Sigma=1350$				
153	11	750	73,4	2,386	1010	составной L=275 мм, №4
153	12	300	76,5	2,470	1100	
153	13	300	74,8	2,407	1025	
		$\Sigma=1350$				
121	14	750	79,0	2,457	1070	составной L=275 мм, с покрытием, №5(4)
121	15	700	79,6	2,381	1085	
		$\Sigma=1450$				
121	16	750	73,7	2,427	1070	раздвижной L=275 мм, №6
121	17	300	73,6	2,405	1080	
121	18	300	74,1	2,409	1050	

		$\Sigma=1350$				
--	--	---------------	--	--	--	--

В настоящее время летные испытания успешно прошли шесть штатных насадков НРО-М. Дополнительно на двух двигателях на фланце охлаждаемого сопла в месте стыка НРО-М были установлены дублированные термоэлектрические датчики температуры, по которым имелись точные измерения при стендовых испытаниях укороченных насадков. Кроме того, имелись прямые измерения температуры внешней поверхности насадков из металлокомпозитов титан-ниобий-титан при работе двигателя на нафтиле. Анализ этих данных показывает, что во время работы тепловое состояние охлаждаемого сопла при установке всех видов насадков практически не меняется и составляет около 130 °С.

Экспериментальные данные по линейному уносу шести насадков длиной 275 мм, приведены на рис. 3.

На графиках этого рисунка точки на сплошных линиях показывают среднюю величину уноса в данном сечении сопла, замеренную по 8-ми точкам в специальном приспособлении. Точки на пунктирных линиях показывают унос, замеренный в промежуточных местах с помощью универсального инструмента после завершения испытаний. Графики представляют собой ломаные линии, поскольку измерения проводились в

строго ориентированных реперных точках. На самом деле поверхность уноса выглядит достаточно плавно без уступов и резких скачков.

Одновременно приведена кривая расчетного уноса составных насадков при времени работы двигателя 1500 с. Пунктирными линиями показан унос в случае, если бы насадки были гладкими, то есть не было межсекционного уступа.

Расчетная зависимость уноса УУКМ от ресурса и температуры полноразмерного НРО-М представлена на рис. 4.

Максимальный унос за время работы 750 с, которое реализуется в настоящее время на двигателе 11Д58М, составляет 0,3 мм при минимальной толщине стенки 4,8 мм. Место его расположения находится на расстоянии 50...100 мм от стыка с охлаждаемой частью сопла. Унос за межсекционным стыком, отнесенный к своему реальному положению в полноразмерном насадке, составит 0,2 мм за время работы 750 с.

При указанных величинах уноса материала прочность конструкции НРО-М и её работоспособность обеспечиваются во всем диапазоне действующих нагрузок и при всех режимах и временах работы двигателя.

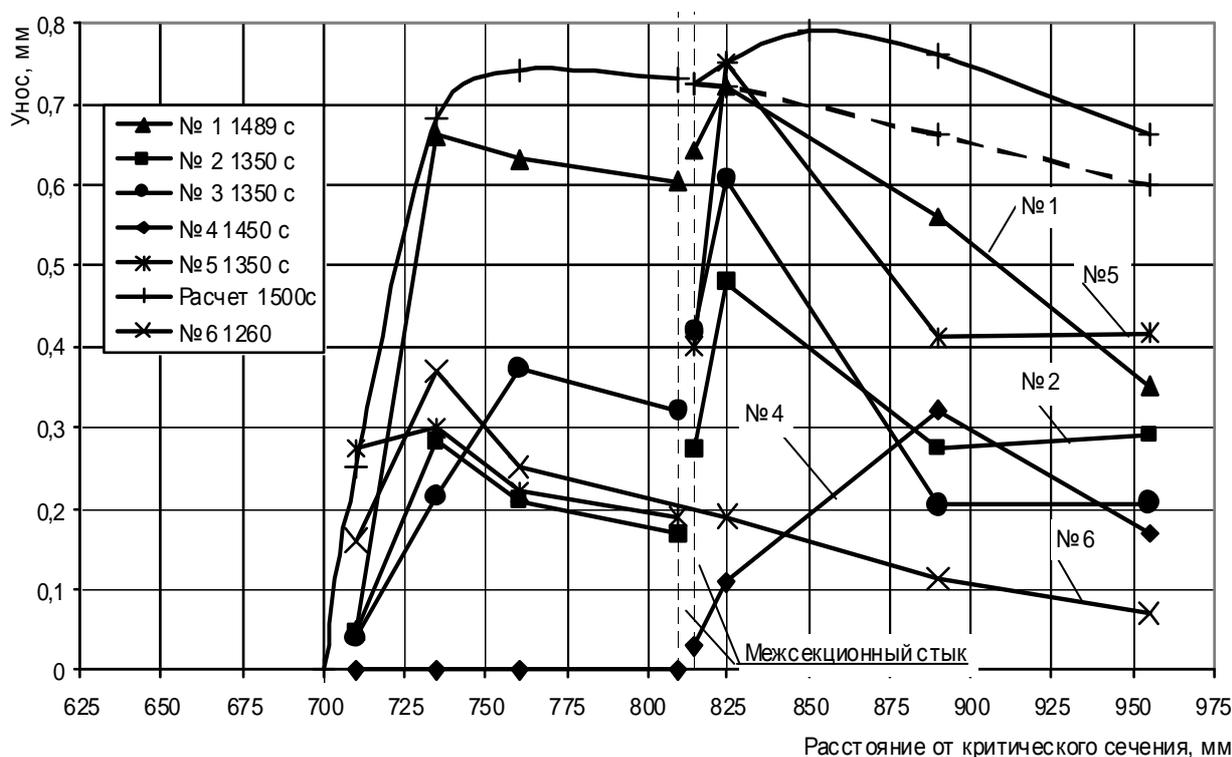


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная зависимости максимального уноса составных насадков от времени работы двигателя

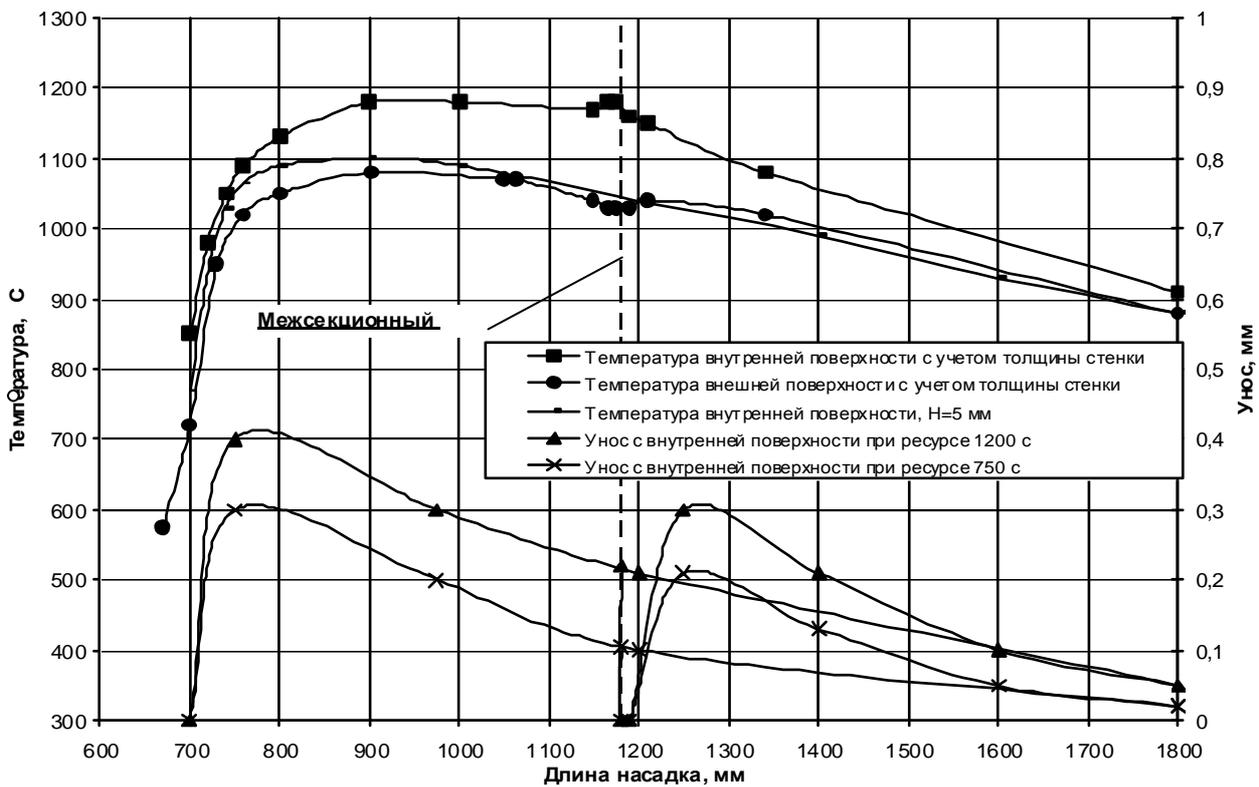


Рис. 4. Расчетная зависимость уноса УУКМ от времени работы двигателя и температуры для составного НРО-М

Анализ прироста удельного импульса тяги двигателя 11Д58М при использовании НРО-М из УУКМ по результатам летных испытаний РБ ДМ-SL

Расчетно-теоретическая оценка прироста удельного импульса тяги МД 11Д58М за счет увеличения степени расширения сопла НРО-М находится в пределах 5...7 с. По данным Центра Келдыша с учетом массы насадка и газодинамических потерь в местах уступов по гладкому контуру сопла суммарные потери составляют 1,1 с; при средней величине теоретического прироста $I_{уд.} = 6$ с фактический прирост составит 4,9 с.

Баллистическая оценка летных испытаний приведена в таблице 4.

Таблица 4. Баллистическая оценка летных испытаний

РБ ДМ-SL	16Л	17Л	18Л	19Л	20Л	22Л
$\Delta I_{нро-м}$	+4,19	+6,30	+4,39	+4,29	+3,88	+5,00

Отбрасывая крайние значения, получаем по результатам летных испытаний среднюю величину $\Delta I_{уд.} = 4,5$ с. Сходимость результатов достаточно хорошая.

Внедрение насадка из УУКМ на двигателя 11Д58М, используемые в программе «Морской старт», дали основание для принятия решения о применении НРО-М в программе «Наземный старт», а также о разработке раздвижного насадка из УУКМ для других проектов, в которых используется МД 11Д58М при наличии ограничений на величину осевого габарита двигателя.

INSTALLATION OF A RADIATION-COOLED NOZZLE OF A CARBON-CARBONIC COMPOSITE MATERIAL TO THE COMBUSTION CHAMBER OF MAIN ENGINE 11D58M РБ ДМ-SL

© 2006 A.V. Mezhevov, V.I. Skoromnov, A.V. Kozlov, N.N. Tupitsin, V.G. Khaskekov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Moscow region

A radiation cooling nozzle of a carbon-carbonic composite material is installed on main engine 11D58M, which is used on the Upper Stage DM-SL as a part of the Zenit-3SL LV in the Sea Launch project. The specific impulse of the engine increased by 4 s through an increase of the nozzle geometric expansion ratio. The results of flight tests show a good convergence with design-theoretical and experimental data.