

УДК 629.036.54-63

Разработка углерод-углеродного соплового насадка для жидкостных ракетных двигателей

М.И. Соколовский¹, С.Н. Петухов¹, Ю.П. Семенов², Б.А. Соколов²

¹*НПО “Искра”, Пермь*

²*РКК “Энергия” им. С.П. Королева, Москва*

E-mail: iskra@iskra.perm.ru

Обобщен успешный опыт РКК “Энергия” и НПО “Искра” по созданию углерод-углеродного насадка для кислород-керосинового жидкостного ракетного двигателя. Описан методический подход, позволивший при сравнительно небольших затратах в полном объеме завершить отработку углерод-углеродного насадка. Представлены результаты практического применения углерод-углеродного насадка для жидкостного ракетного двигателя 11Д58М в рамках Международной космической программы “Морской старт”.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), углерод–углеродный сопловой насадок.

10 июня 2003 года в Тихом океане с экватора ракетоносителем “Зенит–3SL” и разгонным блоком ДМ–SL был выведен на орбиту спутник связи “Thuraya-D2”. Ставший уже привычным, старт ракеты с морской платформы “Одиссей” не привлек к себе особого внимания специалистов и прессы. Тем не менее, именно с этого момента начался отсчет времени практического использования углеродных композиционных материалов в таких теплонапряженных агрегатах, как сопла жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Двигатель 11Д58М, установленный на разгонном блоке ДМ-SL и обеспечивший в соответствии с программой полета двукратное включение с общим временем работы 700 с, оснащен модифицированным насадком радиационного охлаждения (НРО-М) из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). В России такой насадок из углеродного материала применялся на ЖРД впервые, что явилось значительным достижением российского ракетного двигателестроения и первой вехой на пути внедрения углеродных композиционных материалов в конструкции новых и модернизируемых двигателей, с целью повышения их энергетических характеристик.

Необходимость работ по совершенствованию экономических характеристик существующих двигателей была продиктована постоянно растущей конкуренцией на рынке коммерческих услуг по доставке на орбиту космических объектов большой массы и связанных с этим снижением затрат, приходящихся на килограмм выводимого полезного груза. В целом, применение насадка размерностью НРО-М

с увеличенной степенью расширения, по сравнению с существующим металлическим насадком, позволяет увеличить массу полезного груза на 80 кг.

Разработка НРО-М проводилась по контракту между Ракетно-космической корпорацией (РКК) «Энергия» и компанией «Морской старт» (Sea Launch), в рамках совместных работ по повышению энергетических возможностей разгонного блока ДМ-SL. Основным разработчиком модифицированного насадка радиационного охлаждения являлось НПО «Искра» (г. Пермь), обладавшее к моменту начала работ двадцатилетним опытом создания углерод-углеродных насадков для ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). Огневые испытания двигателей, оснащенных насадками из УУКМ, обеспечивала РКК «Энергия». Научное сопровождение разработки осуществлял Исследовательский центр имени М.В. Келдыша. К работе были привлечены также головные тематические институты ЦНИИмашиностроения, НПО «Композит» и др.

Сложность создания НРО-М, кроме ограниченного финансирования и жестких сроков реализации проекта, определялась следующими обстоятельствами:

1. Основные технические требования к насадкам для РДТТ и ЖРД типа 11Д58М, приведенные в таблице, и их сравнение, показывают, что условия работы насадков в ЖРД намного более жесткие, чем в РДТТ.

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

2. Огневые испытания полноразмерного НРО-М с увеличенной геометрической степенью расширения сопла до $fa = 280$ ($r_a = 16,73$) возможны только в условиях баростенда, аналогичного баростенду испытательного комплекса J-4 Центра инженерных разработок «Арнольд» (Arnold Engineering Development Center, AEDC, США). В России подобного стенда нет. Существующий в РКК «Энергия» испытательный стенд позволяет испытывать двигатели до $fa = 140$ ($r_a = 11,83$). Это соответствует длине соплового насадка не более 300 мм. РКК «Энергия» имеет положительный опыт испытаний таких укороченных насадков и методику переноса их результатов на полноразмерные для металлических насадков, подтвержденную летными испытаниями. Необходимо было имеющуюся методику усовершенствовать и распространить на углеродный насадок с учетом опыта НПО «Искра» по отработке насадков для РДТТ.

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

4. 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 с модельных двигателей на полноразмерные двигатели, огневые испытания проводились только на штатных двигателях со штатным креплением

насадка к соплу. Кроме того, все насадки, включая укороченные, изготавливались по принятому на серийном производстве технологическому процессу из материалов, соответствующих требованиям технической документации.

Выбору материала насадка придавалось исключительно важное значение. Выбор проводился путем сравнительного испытания образцов различных УУКМ в составе двигателя. Испытаниям были подвергнуты более 20 разных образцов УУКМ, включая образцы с различными видами покрытий. Образцы вырезались из раструбов РДТТ, изготовленных по серийно освоенным технологиям. Три серии испытаний длительностью 360 (260+100)с, 900 (300+600)с и 754 (154+600)с показали главное — существующие УУКМ обладают химической стойкостью в среде продуктов сгорания двигателя 11Д58М. Сравнительно высокие результаты по стойкости среди испытанных материалов показали два УУКМ, которые и были выбраны: один в качестве основного, второй — резервного материала. Все дальнейшие работы проводились только с УУКМ совместного производства НПО “Искра” и ФГУП “Институт термохимии”.

С учетом перечисленных обстоятельств выработаны принципиальные подходы для решения данной задачи, основные положения которых изложены ниже. Идеология наземной отработки насадков строилась, исходя из возможностей испытательных баз НПО “Искра” и РКК “Энергия”.

С учетом уже имеющихся у РКК “Энергия” данных по металлическим насадкам, расчетным путем определялся температурный режим полноразмерного углеродного насадка и унос его материала в процессе работы двигателя. Область с максимальным уровнем температуры по расчету находилась на внутренней поверхности насадка на расстоянии 150-200 мм от места стыка углерод-углеродного насадка с охлаждаемой частью сопла ЖРД. Разрабатывались две конструкции экспериментальных укороченных насадков:

- гладкого — для определения уносов в зоне воздействия максимальных тепловых потоков;
- составного — с наличием стыка между двумя секциями насадка в штатной конфигурации, но с переносом стыка в зону максимальных тепловых потоков (в более жесткие условия, чем в полноразмерной конструкции).

Составной насадок позволил подтвердить работоспособность стыка между двумя секциями и определить его влияние на унос материала. При этом у всех вариантов экспериментальных укороченных насадков стык между углерод-углеродным насадком и охлаждаемой частью сопла ЖРД выполнен в штатном исполнении. Описанные конструкции представлены на рис. 1 и 2.

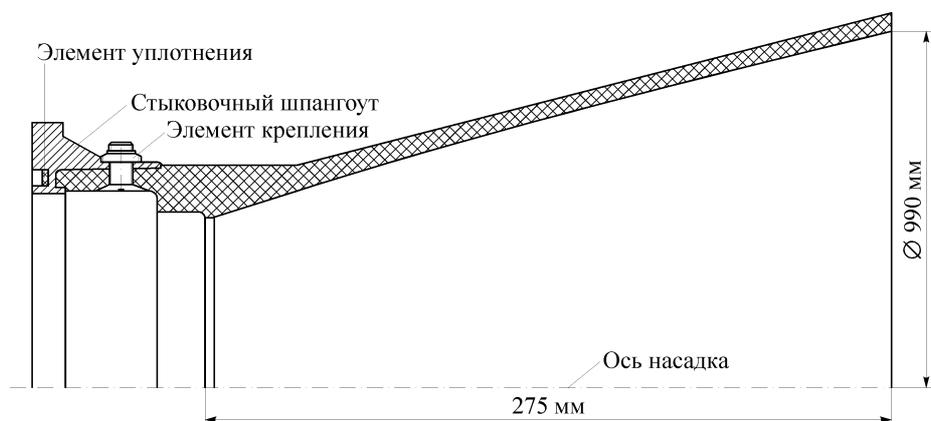


Рис. 1. Укороченный гладкий насадок.

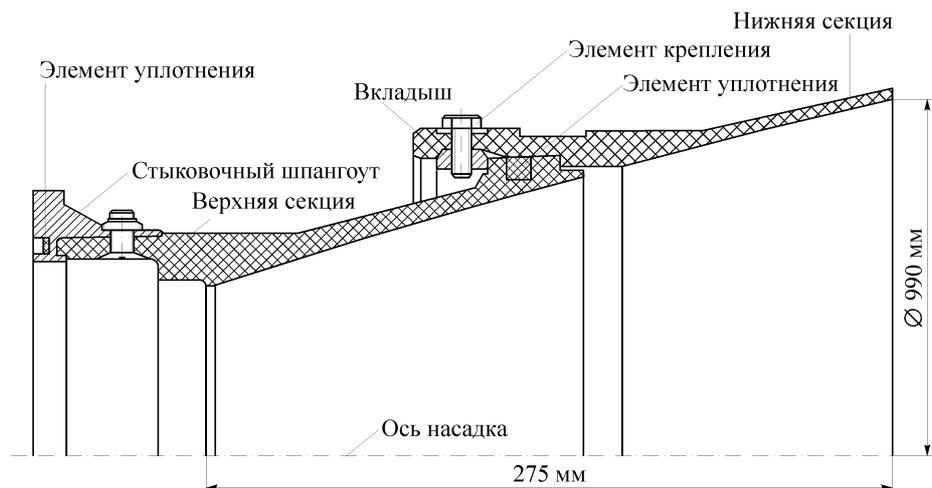


Рис. 2. Укороченный составной насадок.

Была разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния полноразмерного насадка в процессе работы двигателя. На основе этой модели проведена оценка влияния режимов эксплуатации на напряженно-деформированное состояние насадка. Полученная оценка показала, что влияние внутреннего давления в насадке ($0,11 \text{ кгс/см}^2$ на входе и $0,02 \text{ кгс/см}^2$ на выходе из него) и температурных начальных условий его работы составляет не более 10 % теплового воздействия газового потока. На основании этого принято решение провести испытание укороченного насадка длиной 275 мм, внутри которого находится зона максимальных температурных напряжений, с замером в этой зоне температур и деформаций в процессе работы насадка в составе двигателя.

На основе полученных результатов уточнена математическая модель напряженно-деформированного состояния насадка и проведены расчеты запасов прочности полноразмерного насадка с учетом всех действующих факторов. Выбранная длина насадка 275 мм потребовала существенной доработки стенда. Результаты доработки стенда были аттестованы огневыми испытаниями эталонного двигателя, которые подтвердили готовность всего испытательного комплекса к работам с удлиненным на 300 мм соплом.

Отработка насадка на транспортные нагрузки, в том числе на виброударные в процессе работы самого двигателя, а также на акустическое воздействие



проводилась на полноразмерных насадках в штатной комплектации (рис. 3 и 4). Для расчетной оценки работоспособности материала насадка в условиях циклических нагрузок проведены дополнительные исследования характеристик усталости и трещиностойкости, а для определения аэродинамической устойчивости насадка в условиях истечения сверхзвуковой струи определен логарифмический декремент колебаний материала. Такой объем работ

Рис. 3. Насадок радиационного охлаждения из УУКМ.

Масса насадка — 30 кг, геометрическая степень расширения f_a — 280, длина насадка — 1150 мм, диаметр выходного сечения насадка — 1403,5 мм.

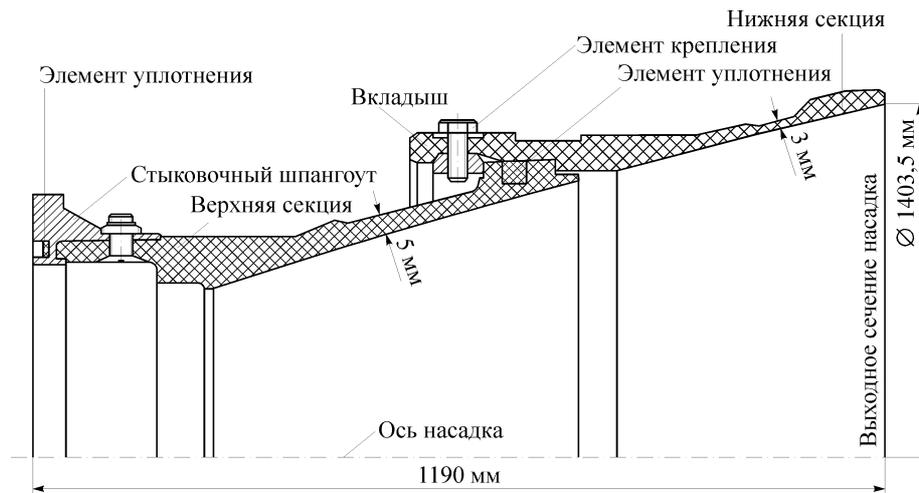


Рис. 4. Полноразмерный насадок радиационного охлаждения из УУКМ.

в методическом плане признан достаточным для определения уровня надежности конструкции и выдачи заключения о готовности насадка к штатной эксплуатации.

По расчетным оценкам максимальный уровень напряжений располагался в зоне стыка насадка с ЖРД и в стыке между двумя секциями насадка. Огневые стендовые испытания проводились с установкой термопар на насадок, в процессе работы определяя его поля температур.

Деформации насадка в процессе работы двигателя выявлялись с помощью установленных на него тензодатчиков. Чтобы подтвердить стойкость углерод-углеродного материала насадка, определить уносы с точностью до 0,01 мм, была спроектирована и изготовлена специальная оснастка, позволившая проводить обмер внутреннего контура насадка в восьми равномерно расположенных по окружности секторах и в шести точках по образующей в каждом секторе. Во время проведения виброударных испытаний в зонах ожидаемых максимальных напряжений также были установлены тензодатчики.

Тепловое состояние сопловых составных насадков при огневых стендовых испытаниях в составе двигателя 11Д58М показано на рис. 5. Анализ поля температур привел к выводу, что при огневых стендовых испытаниях реализованы температуры, не превышающие расчетные. В процессе анализа полученных деформаций

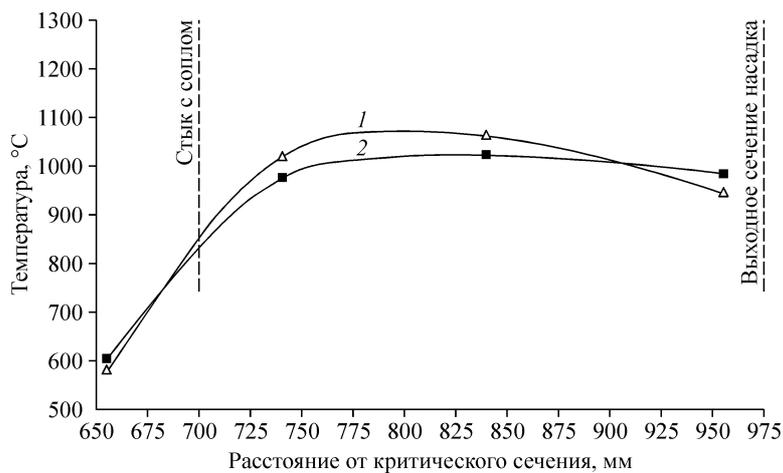


Рис. 5. Тепловое состояние сопловых составных насадков.
Температура внешней поверхности составных насадков: № 1 (1) и № 2 (2).

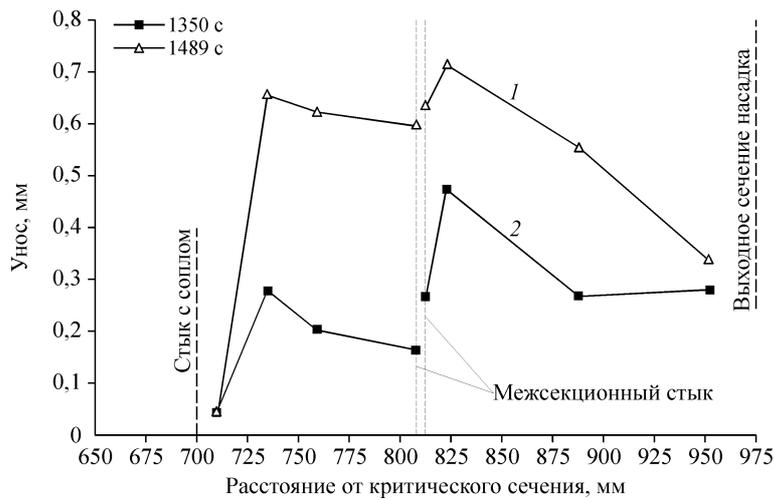


Рис. 6. Экспериментальная зависимость термоэрозионного уноса материала составных насадков от времени работы двигателя.

Температура внешней поверхности составных насадков: № 1 (1) и № 2 (2). Термоэрозионные уносы материалов насадок: 1350 с (№ 2), 1489 с (№ 1).

стало видно, что они полностью отражают картину напряженно-деформированного состояния насадка при работе двигателя, полученную на основании построенной математической модели.

Термоэрозионный унос материала при огневых стендовых испытаниях составных насадков приведен на рис. 6. На представленных графиках видно, что максимальный уровень уноса УУКМ за время работы 1500 с составляет не более 0,8 мм. Причем такой унос отмечен за уступом межсекционного стыка, на расстоянии 10–15 мм от него.

Необходимо отметить, что условия работы межсекционного стыка в составном укороченном насадке значительно более жесткие, чем в реальных условиях. В полноразмерном насадке этот стык находится дальше от критического сечения на ~ 380 мм, в области более низких (на 70–80 °С) температур, чем в экспериментальном укороченном насадке. Можно с большой степенью вероятности полагать, что унос при этом составит, по крайней мере, не более 0,7 мм за время 1200 с.

Расчетная зависимость уноса от ресурса и температуры для полноразмерных гладких насадков приведена на рис. 7. После корректировки программы расчета

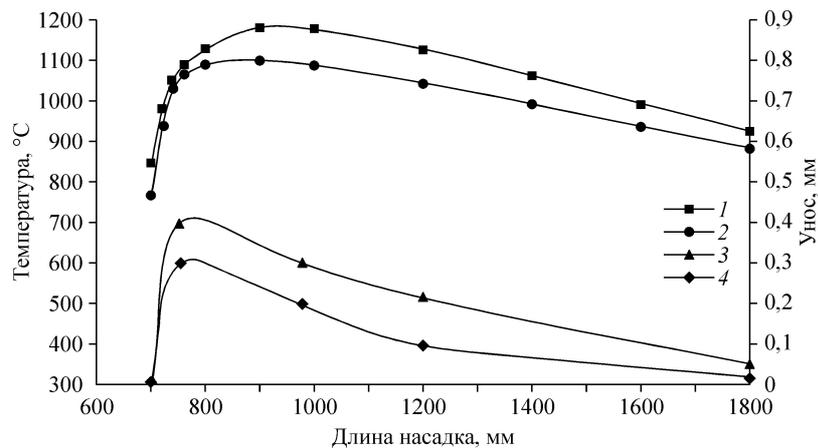


Рис. 7. Расчетная зависимость уноса УУКМ от ресурса и температуры для гладкого НРО-М. Температура внутренней (Н = 5 мм, 1) и внешней (Н = 5 мм, 2) поверхностей, уносы с внутренней поверхности при ресурсах 1200 с (3) и 750 с (4).

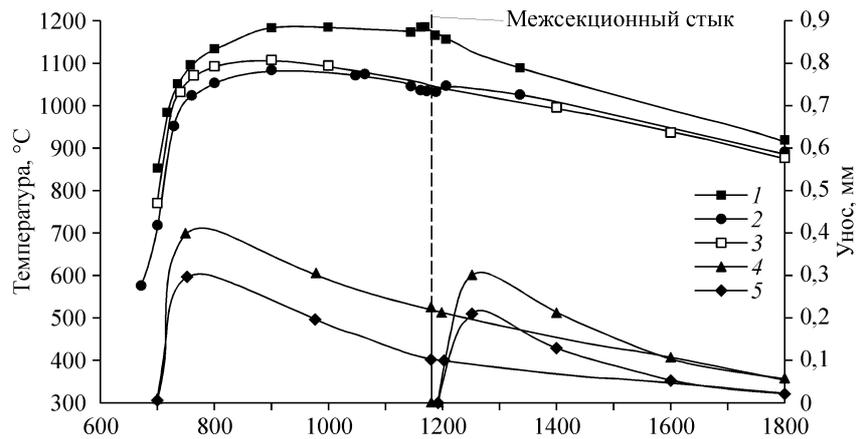


Рис. 8. Расчетная зависимость уноса УУКМ от ресурса и температуры для составного НРО-М. Температура внутренней (1) и внешней (2) поверхностей с учетом толщины стенки, температура внутренней (3) поверхности при $H = 5$ мм, уносы с внутренней поверхности при ресурсах 1200 с (4) и 750 с (5). Четыре линии после стыка секций насадка означают: две нижние — расчетные, две верхние — расчет с учетом результатов испытаний.

по полученным экспериментальным данным, показаны расчетные характеристики уноса для ресурса 750 с и 1200 с.

По экспериментальным данным уноса для укороченного составного насадка спрогнозирован унос в области межсекционного стыка полноразмерного насадка с учетом реальной толщины насадка. Эта зависимость приведена на рис. 8.

В процессе проведения испытаний полноразмерного насадка на акустическое воздействие в акустической камере РКК “Энергия” проводились замеры уровня виброускорений и деформаций в контролируемых точках конструкции насадка. Полученные результаты позволили сделать заключение, что при действии акустического давления на этапе выведения на орбиту запас прочности насадка более 5. Проведены также расчеты по определению возможности возникновения флаттера насадка. Определен коэффициент динамической устойчивости по флаттеру $K_y = 10$, что свидетельствует об отсутствии возможности возникновения автоколебаний насадка.

Таким образом, изложенный методический подход, включающий проведение расчетно-теоретических, проектно-конструкторских, исследовательских и экспериментальных работ позволил в течение 2000–2002 гг. завершить в полном объеме отработку углерод-углеродного насадка и по их результатам дать положительное заключение о возможности применения НРО-М на двигателе 11Д58М. В 2002 году НПО “Искра” поставило в РКК “Энергию” первый товарный углерод-углеродный насадок для установки на разгонный блок ДМ-SL ракеты носителя “Зенит-3SL” по программе “Морской старт”, который успешно прошел летные испытания.

В настоящее время можно констатировать, что Ракетно-космической корпорацией “Энергия”, Научно-производственным объединением “Искра”, Научно-исследовательским центром им. М.В. Келдыша, ЦНИИМАШем создана расчетно-методическая база, позволяющая уверенно вести разработку углерод-углеродных насадков для жидкостных ракетных двигателей.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2008 г.