

УДК 621.454.22.018

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТКИ ЖРД С СОПЛОВЫМ НАСАДКОМ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

© 2009 В. Н. Шнякин, А. Н. Коваленко

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», г. Днепропетровск

Представлены особенности экспериментальной стендовой отработки ЖРД с сопловым насадком из УУКМ, в котором стык охлаждаемой части с сопловым насадком совмещён с сечением симметричного вдува отработанного генераторного газа: применение малогабаритной барокамеры, охватывающей только сопловый насадок из УУКМ; выполнение температурных замеров в насадке из УУКМ и применение неразрушающих методов контроля на различных этапах изготовления и эксплуатации сопловых насадков из УУКМ.

*Углерод-углеродный композиционный материал, камера двигателя, сопловый насадок, жидкий ракетный двигатель, огневое испытание*

Увеличение степени расширения газов в сопле - один из широко используемых в настоящее время способов по повышению удельного импульса тяги ЖРД верхних ступеней космических ракетносителей.

Современное состояние технологии производства углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) способствует их использованию для изготовления сопловых насадков с большой степенью расширения. К очевидным достоинствам УУКМ следует отнести их низкую плотность (от 1,2 до 1,9 г/см<sup>3</sup>) и высокие механи-

ческие свойства в рабочем диапазоне температур (900...2500°С). Однако характер зависимости механических свойств различных УУКМ от температуры (рис. 1) показывает, что при нормальной температуре прочность материала соплового насадка из УУКМ меньше, чем в рабочем диапазоне температур.

Кроме того, одной из характерных особенностей УУКМ является низкое значение допустимых деформаций, что приводит к повышенной хрупкости материала УУКМ.

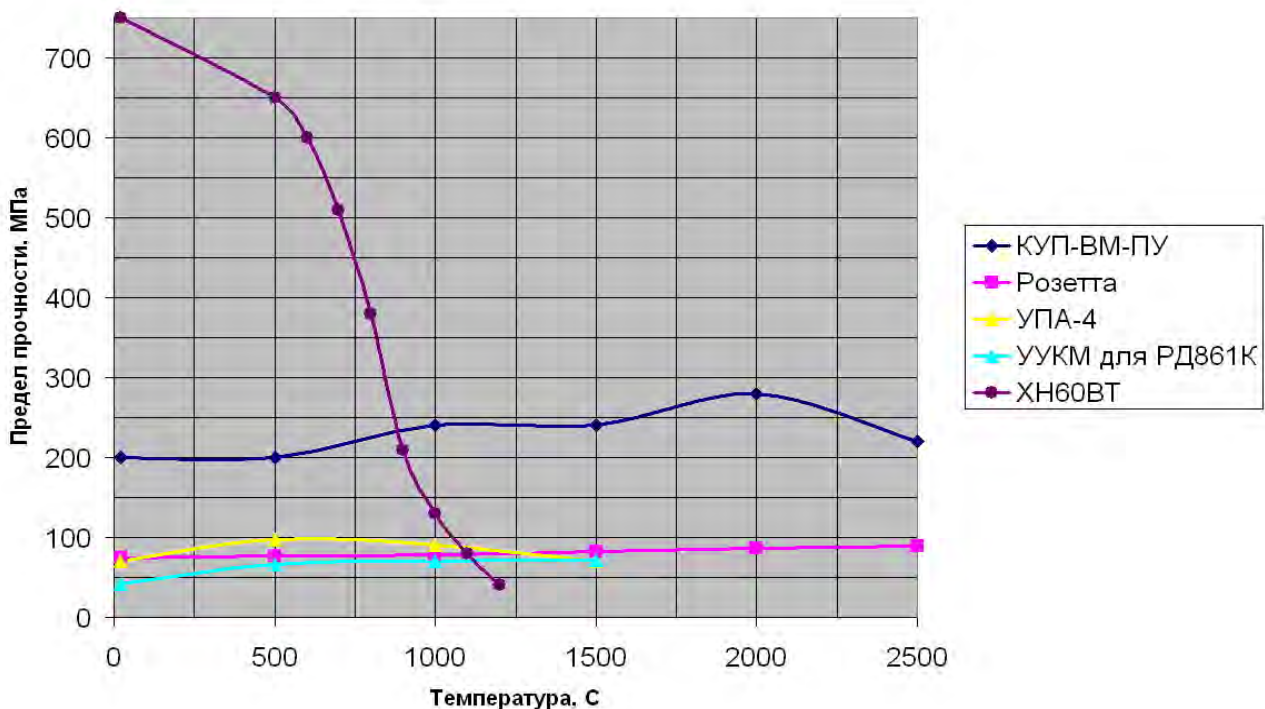


Рис. 1. Характер зависимости механических свойств различных УУКМ (предела прочности при сжатии) от температуры

С другой стороны, при стендовых испытаниях на запуске могут возникать нештатные силовые динамические усилия, значительно превышающие полётные нагрузки. Таким образом, при стендовой отработке ЖРД с сопловым насадком из УУКМ наиболее критичным моментом является проведение запуска двигателя.

При модернизации двигателя 11Д58М, которая включала замену металлического соплового насадка на насадок из УУКМ с увеличенной степенью расширения, для снижения силовых нагрузок при запуске, а также для уменьшения стоимости подготовки и проведения испытаний стендовые огневые испытания двигателя проводились с укороченным сопловым насадком [1], при этом проверялись наиболее нагруженные участки соплового насадка.

Для двигателя РД861К (рис. 2), в котором используется сопловая насадка из УУКМ, такой подход неприемлем, так как по компоновочным соображениям узел стыка соплового насадка из УУКМ с корпусом камеры совмещен с узлом симметричного вдува отработанного генераторного газа в закритическую часть сопла. Такое решение позволило существенно упростить компоновку двигателя и использовать вдув генераторного газа для дополнительного охлаждения сопла. С другой стороны, это привело к повышению температуры конструкции в узле стыка до температуры генераторного газа и смещению, по расчетной оценке за счет размыва вдуваемого газового присте-

ночного слоя, участка с максимальными температурами от места стыка к срезу сопла.

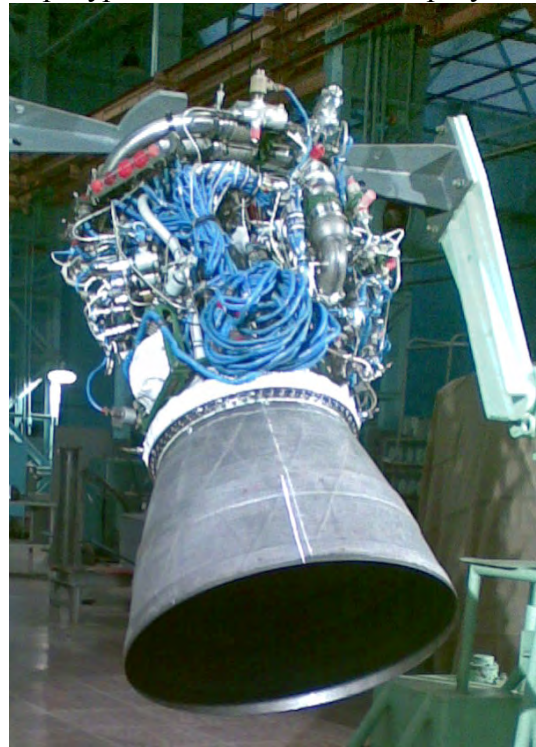


Рис. 2. Двигатель РД 861К с сопловым насадком из УУКМ

Повышение температуры узла стыка в сочетании со значительными отличиями в коэффициентах линейного температурного расширения между УУКМ и материалами корпуса камеры привело к заметным относительным радиальным перемещениям соплового насадка и корпуса камеры, необходимость компенсации которых усложнила конструкцию узла стыка (рис. 3) и потребовала введения упругих силовых элементов.

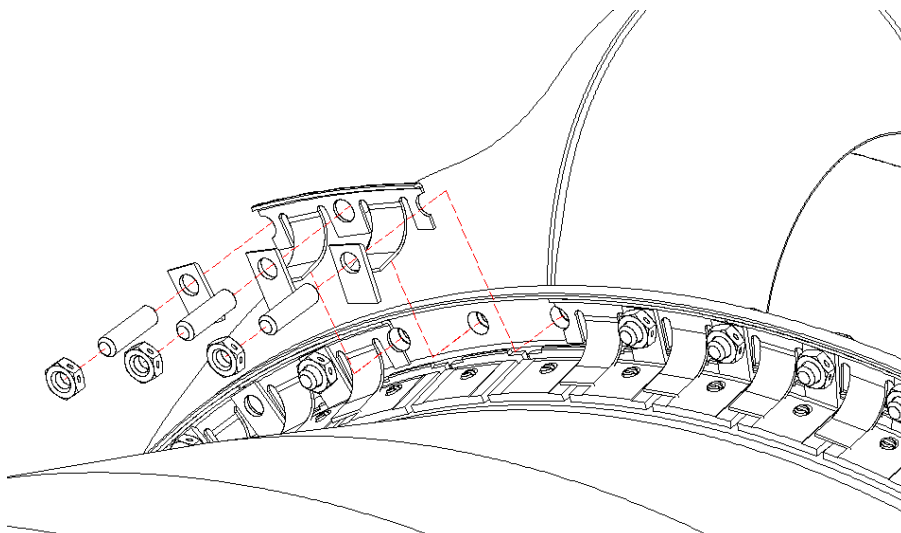


Рис. 3. Узел стыка соплового насадка из УУКМ с корпусом камеры

Смещение участка с максимальными температурами к срезу сопла приводит к необходимости подтверждения в стендовых условиях работоспособности полноразмерного сопла, включающего участок с максимальными ожидаемыми температурами поверхности сопла. Для выполнения такой проверки в идеале необходима барокамера, оснащенная газоежекторной установкой, предназначенной для создания предварительного вакуума во всем объеме барокамеры. Однако создание такой барокамеры очень дорогостоящее и продолжительное по времени мероприятие. Эксплуатация барокамеры также сопровождается большими затратами, обусловленными работой газоежекторной установки. При отработке двигателя РД861К была разработана и использована малогабаритная барокамера, которая создавала условия, приближенные к полетным, только на наружной поверхности соплового насадка (рис. 4). Небольшой дополнительный объем малогабаритной барокамеры позволяет производить вакуумирование ее внутренней полости за счет эжекции основного потока продуктов сгорания.

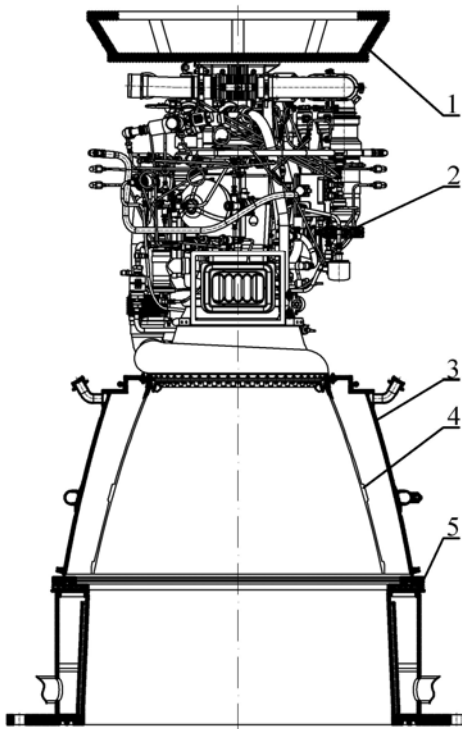


Рис. 4. Двигатель РД861К с вакуумной камерой:  
1-рама силоизмерительного устройства; 2-двигатель РД861К;  
3-камера вакуумная; 4-насадка из УУКМ; 5-регулирующее кольцо ГДТ

Оценка работоспособности материала соплового насадка и конструкции узла стыка насадка из УУКМ с корпусом камеры производится по результатам огневых испытаний по двум схемам: первая – с минибарокамерой, вторая – в атмосферных условиях без барокамеры.

Испытания по первой схеме проверяют эрозионную стойкость материала соплового насадка в условиях, максимально приближенных к полетным. С этой целью соединение «подвижной» камеры двигателя с «неподвижной» барокамерой должно быть гибким, эластичным и герметичным, а внутренняя поверхность барокамеры, обращенная к соплу, должна поглощать все тепловое излучение от сопла. Конструкция минибарокамеры, состоящая из водоохлаждаемой оболочки без продольного разъема со специально окисленной внутренней поверхностью, полностью удовлетворяет вышеуказанным требованиям.

Испытания по второй схеме требуют меньшей подготовки к проведению испытания и позволяют сделать оценку работоспособности конструкции узла стыка соплового насадка с корпусом камеры и материала УУКМ в более нагруженных условиях. При испытаниях в атмосферных условиях без барокамеры статические напряжения, возникающие в наиболее критичных сечениях, в 5...7 раз превышают полетные нагрузки, хотя направление нагрузки при этом испытании противоположно полетной. Низкая стойкость УУКМ к ударным нагрузкам, неизменно возникающим на запуске, потребовала усовершенствовать конструкцию узла герметизации среза сопла камеры с входом в газоотводящий тракт стенда. Так, если традиционно технологический зазор формировался в радиальном направлении: наружная поверхность сопла – стендовые сегменты и минимизировался для уменьшения подсоса воздуха уменьшением радиальных зазоров до величины 2...3 мм (рис. 5). В этом случае в момент запуска под действием боковых сил возможно соударение среза сопла о стендовые сегменты. Зазор исключает механическую связь между двигателем и неподвижной частью стенда для повышения точности замера тяги.

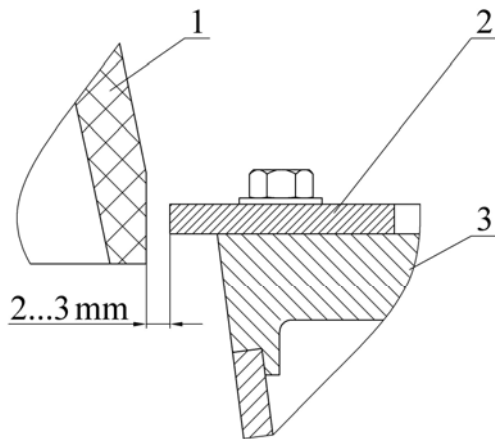


Рис. 5. Технологический зазор между наружной поверхностью сопла и стендовыми сегментами: 1-насадок из УУКМ; 2-сегмент; 3-регулирующее кольцо ГДТ

С целью предотвращения возможности соударений соплового насадка об элементы стендового оборудования была изменена конструкция узла стыка среза соплового насадка со стендовым оборудованием. В модернизированной конструкции зазор формируется в осевом направлении (рис. 6), что в принципе исключает возможность соударения на запуске.

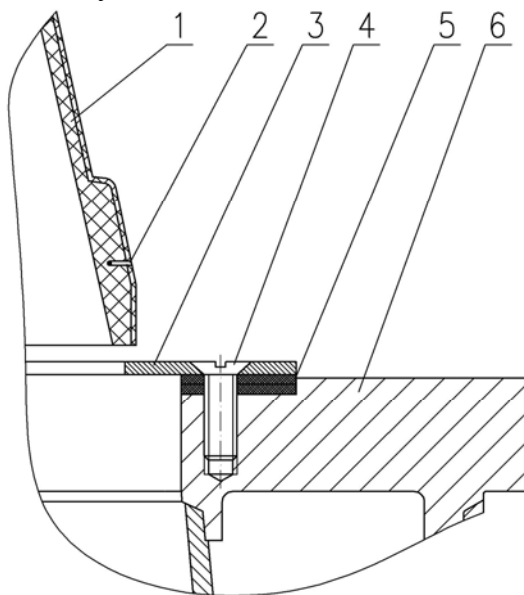


Рис. 6. Модернизированная конструкция узла стыка среза соплового насадка со стендовым оборудованием: 1-насадок из УУКМ; 2-термопара; 3-кольцо; 4-винт; 5- паронитовые кольца; 6-регулирующее кольцо ГДТ

Применение минибарокамеры позволило попутно решить еще одну задачу: защиту соплового насадка от случайных ударных воздействий в процессе сборочно-монтажных и транспортировочных работ. Актуальность данной проблемы продиктована высокой хрупкостью материала УУКМ.

Технологические особенности изготовления УУКМ приводят к получению характерной шероховатой структуры материала на внутренней поверхности сопла, некоторому искажению внутреннего контура в процессе высокотемпературной обработки. Эти особенности, наряду с влиянием вдуваемого в пристеночный слой низкотемпературного газа, затрудняют расчетную оценку величины удельного импульса тяги, поэтому ее необходимо определять экспериментально. Наличие гибкой герметичной мембраны между камерой и барокамерой вносит дополнительную погрешность в определение тяги, поэтому требуется проведение тарировки силоизмерительного устройства. При проведении этой тарировки необходимо учитывать линейные температурные перемещения двигателя в процессе работы и воздействие внешнего атмосферного давления на поверхность гибкой мембраны.

Низкая стойкость УУКМ к ударным нагрузкам обуславливает необходимость проведения неразрушающего контроля на различных этапах изготовления и эксплуатации соплового насадка из УУКМ. Для гарантированного выявления дефектов применялись несколько взаимодополняющих методов контроля. Так, наряду с общераспространенным ультразвуковым методом (рис. 7), внедряются новые методы: электронная ширография и контроль сплошности при помощи тепловизора. Транспортировочные и монтажные операции на огневом стенде – потенциальные источники несанкционированных ударных нагрузок, поэтому установки для проведения неразрушающего контроля используются в мобильном исполнении.

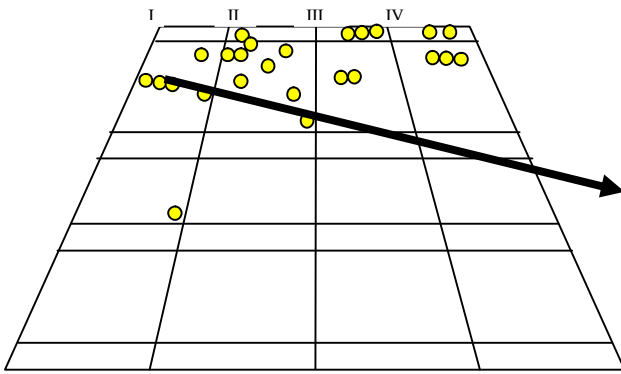


Рис. 7. Результаты контроля УЗК

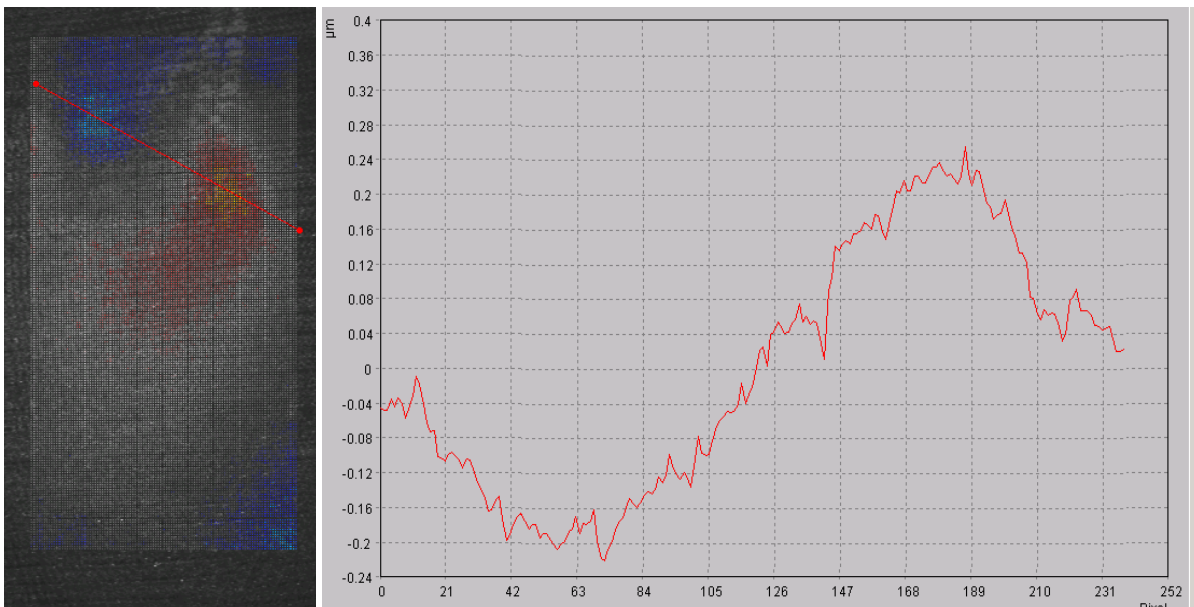


Рис. 8. Дефектная зона, выявленная методом электронной ширрографии

Температура соплового насадка является важной характеристикой, определяющей его работоспособность, особенно если применяется внутреннее охлаждение при помощи симметричного вдува генераторного газа. В настоящее время определение температурного поля может выполняться при помощи тепловизора или терморегулирующих покрытий. Эти методы позволяют получить пространственное распределение поверхностных температур на наружной поверхности соплового насадка, оценить окружающую неравномерность, эффективность симметричного вдува. Однако отработка и применение этих методов приводит к существенному увеличению стоимости испытаний, кроме того, эти методы не могут использоваться в полетных условиях.

Замер температур при помощи термопар: широко освоенный и относительно недорогой метод, который может применяться и в полете. Однако это точечная оценка теплового состояния, поэтому место установки термопар, тип термопар и их количество требуют тщательного анализа. Кроме того, для организации измерений температуры на УУКМ необходимо модернизировать и способ установки термопар. Традиционно используемый способ установки термопар – при помощи точечной сварки и металлической фольги - для насадков из УУКМ не подходит. Замена сварки на клеевое соединение не позволяет получить требуемой прочности соединения.

В процессе отработки опытной конструкции были опробованы различные способы установки и крепления термопар на со-

пловой насадок из УУКМ. Термопары, установленные при помощи клеевого соединения, больше одного огневого испытания не выдерживали, при этом часть термопар отрывались уже на запуске. Наилучшие результаты показали два способа: фиксация

спая термопары при помощи термостойких упругих элементов (рис. 9) и установка термопары в наклонное глухое отверстие до упора в дно и фиксация термостойким клеевым составом (рис. 10).

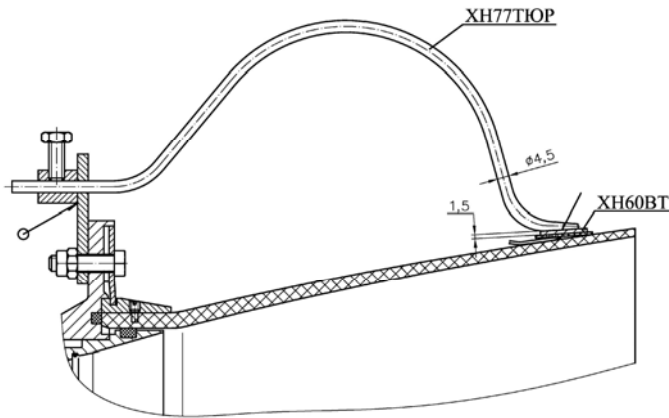


Рис. 9. Измерение поверхностной температуры насадка из УУКМ при помощи термостойких упругих элементов

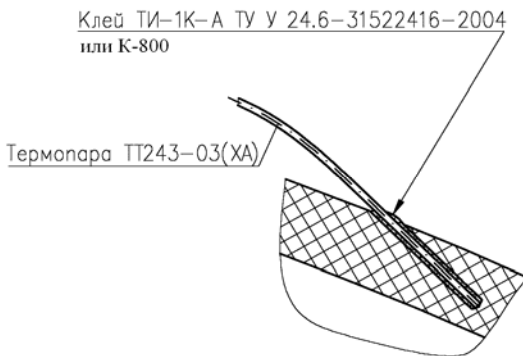


Рис. 10. Установка термопары в отверстие до упора в дно с фиксацией термостойким клеевым составом

Для малогабаритной опытной установки лучшие результаты показал первый способ, при этом показания температур относительно традиционного способа увеличились за счет приближения к истинной температуре на 200...250°C, простой монтаж/демонтаж термопары позволяет их повторно использовать. Для более габаритных сопловых насадок целесообразно применение второго способа, в этом случае контролируется не температура наружной поверхности, а темпера-

тура материала вблизи огневой поверхности (что более представительно).

Применительно к сопловому насадку камеры двигателя РД861К при выборе мест установки термопар необходимо учитывать и особенности конструкции насадка: сопловой насадок в стендовом исполнении имеет два силовых кольцевых усиления, в которых и целесообразно выполнять установку термопар. В любом случае с целью повышения надежности закрепления термопар целесообразно иметь максимально возможную глубли-

ну отверстия под термопару, для чего эти отверстия необходимо выполнять наклонными.

### **Библиографический список**

1. Патент Украины №85854. Пристрій кріплення соплового насадка з композиційного неметалічного матеріалу до камери рідинного ракетного двигуна [Текст] / В.Н. Шнякин, А. Н. Коваленко, В. Г. Переверзев, Р. А. Марчан (Украина).- № а 2006

05873; заяв. 29.05.2006; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5. – 14 с.

### **References**

1. Patent of Ukraine # 85854. Device of the nozzle extension from composite non-metallic material fastening to combustion chamber of a liquid rocket engine [Text]/ V.N. Shnyakin, A.N. Kovalenko, V.G. Pereverzyev, R.A. Marchan (Ukraine). - # a 2006 05873; appl. 29.05.2006; publ. 10.03.2009, bulletin # 5. – 14p.

## **EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF THE LRE WITH CCCM NOZZLE'S EXTENSION**

© 2009 V. N. Shnyakin, A. N. Kovalenko

Yuzhnoye State Design Office, Dnepropetrovsk, Ukraine

The peculiarities of experimental stand development of LRE with a nozzle extension from CCCM are presented, in which the zone of the cooling part mating with nozzle extension is combined with a section of symmetrical injection of the waste generator gas: application of small-size vacuum cell embracing only the CCCM nozzle extension; temperature measurement in the nozzle extension and application of the nondestructive methods of control at different phases of manufacture and exploitation of the CCCM nozzle extension.

*Carbon-carbon composite material, combustion chamber, nozzle extension, liquid rocket engine, firing tests*

### **Информация об авторах**

**Шнякин Владимир Николаевич**, академик МАА, начальник конструкторского бюро двигательных установок Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: [info@yuzhnoye.com](mailto:info@yuzhnoye.com). Область научных интересов: разработка ЖРД.

**Коваленко Андрей Николаевич**, начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное», Украина. Тел. (+380562) 38-47-28. E-mail: [info@yuzhnoye.com](mailto:info@yuzhnoye.com). Область научных интересов: разработка ЖРД.

**Shnyakin Vladimir Nikolaevich**, IAA academician, Head of Propulsion System Designer of Spacecraft, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: [info@yuzhnoye.com](mailto:info@yuzhnoye.com). Area of research: LRE development.

**Kovalenko Andrey Nikolaevich**, Head of Department, Yuzhnoye State Design Office, Ukraine. Phone: (+380562) 38-47-28. E-mail: [info@yuzhnoye.com](mailto:info@yuzhnoye.com). Area of research: LRE development.