

Секция 3

**Основоположники аэрокосмического
двигателестроения и проблемы теории и
конструкций двигателей летательных аппаратов**

**РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
НПО ЭНЕРГОМАШ – 85 ЛЕТ В РАБОТЕ**

В.Ф.Рахманин, В.С.Судаков

(ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П.Глушко», Химки, Россия)

www.npoem.ru, e-mail: energo@online.ru

15 мая 2014 года исполняется 85 лет со дня создания НПО Энергомаш. В отличие от многих других дат - это не была дата выхода приказа или постановления об образовании предприятия, а дата первого рабочего дня двадцатилетнего В.П. Глушко, который возглавил небольшое подразделение в составе Газодинамической лаборатории в Ленинграде. Но именно с этого дня под руководством академика В.П. Глушко начались работы по созданию первых образцов ракетных двигателей в Ленинграде, которые затем продолжились в стенах РНИИ, затем в «шарашке» в Казани. После командировки в Германию большой группы специалистов ОКБ-СД и завода №456 с 1946 года основной площадкой работ становятся Химки, где были разработаны двигатели для первых советских баллистических ракет дальнего действия, первых межконтинентальных ракет. Именно здесь были созданы прославленные двигатели РД-107 и РД-108, обеспечившие запуск первого спутника и полет первого человека в космос. Большой и славный путь прошло предприятие, на самом высоком уровне занимаясь вопросами разработки передовых образцов ракетно-космической техники. НПО Энергомаш становится общепризнанным мировым лидером в разработке мощных ЖРД. Двигатели НПО Энергомаш обеспечивают запуски практически всех отечественных космических аппаратов, а в современной истории двигатели НПО Энергомаш устанавливаются и в состав иностранных космических ракет-носителей. Дело академика В.П. Глушко продолжают его ученики, создавая новые мощные двигатели для перспективных РН. В докладе сообщается о некоторых научных и технических достижениях НПО Энергомаш в разработке ЖРД, о его ближайших планах.

**СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ
МАРШЕВЫХ КЕРОСИН-КИСЛОРОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В США И РОССИИ**

Базаров Владимир Георгиевич¹, Янг Вигор²

(¹ МАИ, Россия, ² DIT, USA)

Высокочастотная неустойчивость (ВЧН) рабочего процесса в камерах сгорания (КС) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) до сих пор остаётся одной из главных проблем при разработке ЖРД. Несмотря на многочисленные исследования, не создано методики обеспечения устойчивости работы двигателя на стадии его проектирования, и разработка нового ЖРД требовала проведения дорогостоящих работ по его доводке. В докладе проводится сравнение методов доводки КС двух близких по тяге маршевых ЖРД на компонентах керосин + O₂ж – американского F-1 и российского РД-170.

К началу разработки F-1 (1959 г.) в США уже были знакомы с ВЧН при разработке ЖРД меньших тяг E-1, MA-2 (для Р.Н. Атлас), H-1 (Р.Н. Сатурн-1). В проекте исходного варианта F-1 была использована схема смесеобразования со струйными форсунками со сталкивающимися струями, расположенными по концентрическим окружностям на плоском огневом днище и образующими радиально ориентированные “лепестки” пелён распыливаемых компонентов, чрезвычайно чувствительные к поперечным колебаниям давления и скорости в КС. Это обусловило возникновение в ней интенсивной ВЧН с частотой 500 гц, соответствующей первой тангенциальной моде колебаний, амплитуда которых достигала 400% от P_k . Механизм ВЧН, по мнению разработчиков F-1, связан с воздействием колебаний поперечной скорости при возникновении вращающейся моды в КС. Время доводки ЖРД F-1 заняло 8 лет, в течение которых было проведено 1332 полноразмерных испытаний КС с 108 вариантами головок и более 800 испытаний элементов. Общая стоимость работ превысила \$4 миллиарда. Доводка проводилась по следующим направлениям. 1) Повышение акустических потерь в КС путём введения охлаждаемых перегородок и установки акустических поглотителей. 2) Понижение усилительных свойств зоны горения путём ухудшения качества распыливания, растягивания зоны горения по длине КС, уменьшения расхода горючего на завесу с 10,3% до 3,2%. Эти мероприятия снизили амплитуду колебаний давления в КС до 13,5 бар, однако не устранили жёсткое возбуждение ВЧН. И только когда установили различные перепады давления на форсунках горючего (ΔP_r снизили с 24,5 бар до 6,35 бар) и O₂ж (ΔP_o снизили с 24,5 бар до 21 бар), а

диаметр отверстий в форсунках горючего увеличили с 3,66 мм до 7,12 мм; окислителя с 4,4 мм до 6,14 мм, ВЧН была устранена.

Проведенные расчёты динамических характеристик форсунок F-1 показали, что если исходный вариант обеспечивал практически синхронные колебания расходов, то введенные изменения вызвали колебания соотношения компонентов, в силу чего в зоне горения образованы области смешения и догорания нестехиометрических горючих смесей. Это удлинит зону горения, снизило удельное тепловыделение и полноту сгорания с 93,19% до 92,9% и полностью подавило ВЧН. По существу, смесительная головка, кроме основного назначения – образования горючей смеси - стала дополнительно выполнять функции нелинейного серво-стабилизатора, реагируя на повышение амплитуды колебаний давления в КС ростом количества нестехиометрической горючей смеси в зоне горения.

В отношении ЖРД РД-170 можно отметить, что его разработчики, имея богатый опыт борьбы с ВЧН на ЖРД предыдущих поколений, изначально заложили в схему РД-170 мероприятия, направленные как на повышение акустических потерь, так и на серво-стабилизацию ВЧН. Так, был выбран 4-х-камерный вариант, что уменьшило размеры каждой камеры и увеличило собственную частоту первой тангенциальной моды до 2200 Гц. Выбор замкнутой схемы с дожиганием окислительного генераторного газа, хоть и вызвал дополнительные проблемы с нагретым газообразным окислителем, является стабилизирующим фактором по отношению к ВЧН в КС, так как позволил использовать газовые ступени форсунок в качестве акустических поглотителей, настроенных на вынос акустической энергии в газовод. Конструкция акустических перегородок из дискретных испарительных форсунок оказалась более эффективна, чем сплошные перегородки у F-1. Применение газожидкостных форсунок внутреннего смешения с периферийным подводом закрученного горючего, распиливаемого с внутренней поверхности заглубленными струями газообразного окислителя, обеспечило одновременное смешение и выгорание горючего, впрыснутого в форсунку в различные моменты времени. Это обусловило практическую нечувствительность ступени горючего к высокочастотным колебаниям в КС. Ступень окислителя, напротив, имеет максимальную чувствительность к колебаниям давления, в силу чего форсунка при возникновении в КС колебаний давления, генерируют колебания соотношения компонентов, ещё более интенсивные, чем головка ЖРД F-1. То же свойство можно отметить и в отношении форсунок перегородок. Испарительная часть ступени горючего выполнена в виде длинных прямых и спиральных каналов, в

плане их акустики представляет собой активное сопротивление, а окислительная ступень является резонатором с максимальным значением акустической скорости у выходной части. Такие форсунки также генерируют интенсивные колебания соотношения компонентов. Таким образом, нетрудно заметить, что несмотря на существенно различные циклы, различное давление в КС, собственные частоты колебаний, основным средством в обеих ЖРД явился механизм сервостабилизации ВЧН путём введения обратной связи амплитуды колебаний давления со структурой зоны горения.

**РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И
ФОРСУНОК ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ЖРД ЗАМКНУТОЙ СХЕМЫ
НА КОМПОНЕНТАХ $O_{2ж}$ + КЕРОСИН**

А.П. Аджан¹, В.Г. Базаров²

*(¹ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко»,
Химки, Россия, ²МАИ)*

На основе анализа особенностей организации рабочего процесса в ЖРД замкнутой схемы обоснован выбор окислительного или восстановительного цикла для различных пар компонентов. Для окислительного замкнутого цикла, характерного для компонентов $O_{2ж}$ + керосин, разработана схема смесеобразования в двухкомпонентных центробежно-центробежных форсунках, исключающая процесс распыливания компонентов, со смешением пелён горючего и части окислителя в окислительных камерах закручивания с образованием в них обратных токов, стабилизирующих горение. Таким образом, наиболее чувствительная к внешним воздействиям начальная часть пламени спрятана внутри форсунки, выполняющей роль предкамеры, в факеле горения в которой осуществляется испарение пелены горючего и поэтапное испарение стабилизированного на стенке потока закрученного окислителя, предохраняющего стенки форсунки от перегрева. Разбавление продуктов сгорания холодным кислородом осуществляется испарением внутренней поверхности вращающейся жидкостной пелены и впрыском осевых струй кислорода. Ввиду отсутствия в зоне горения конгломерата горящих капель, процесс горения мало чувствителен к возмущениям давления, а размещение его внутри форсунок делает его нечувствительным к поперечным колебаниям скорости в газогенераторе. Численный анализ показал, что ввиду одновременного выгорания в предкамере компонентов, впрыснутых в неё в различные моменты времени, процесс практически нечувствителен к колебаниям расхода окислителя, а динамические характеристики открытой центробежной форсунки горючего с

длинной камерой закручивания обуславливает её слабую чувствительность к высокочастотным колебаниям перепада давления. В силу этого, разработанная форсунка обеспечивает устойчивость рабочего процесса по отношению, как к поперечным, так и к продольным модам акустической неустойчивости. Ввиду отсутствия процесса распыливания при образовании горючей смеси, форсунка не критична к изменению перепада давления в значительно более широком диапазоне и позволяет осуществлять глубокое дросселирование газогенератора.

Результаты компьютерного моделирования рабочего процесса в форсунке газогенератора показали, что в области низких частот чувствительность форсунки горючего к колебаниям перепада давления возрастает, что приводит к возможности возбуждения колебаний концентрации горючей смеси и образования волн энтропии, распространяющихся с потоком продуктов сгорания по тракту горения. Предложена программа проведения научных исследований с целью разработки мероприятий по подавлению энтропийных волн путём изменения динамических характеристик форсунки горючего.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И МАКРОКИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В БИРЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

А.В. Воронцовский, К.Ю. Арефьев

(МГТУ им Н.Э. Баумана, кафедра «Ракетные двигатели»)

Проблема создания эффективных и надежных систем воспламенения является актуальной при разработке перспективных энергосиловых и технологических установок различного назначения, основными структурными элементами которых являются генераторы высокоэнэнтальпийного потока (ГВП). Широкий диапазон характеристик, многообразие используемых компонентов топлива и применяемых конструктивных решений в ГВП делают необходимым проведение детальных исследований инициирования рабочего процесса в каждом конкретном случае.

Работа посвящена выбору и оптимизации параметров бирезонаторной системы воспламенения (БСВ) воздушно-метановой смеси в ГВП. БСВ является модификацией резонансной газодинамической системы воспламенения (ГСВ). Следует подчеркнуть, что в ГСВ классической конфигурации не удастся достигнуть надежного воспламенения указанной топливной композиции.

БСВ состоит из двух направленных навстречу друг другу ГСВ, каждая из которых включает сверхзвуковое сопло и резонатор с незамкну-

той торцевой поверхностью. Через одно из сопел подается газообразное горючее, через другое - окислитель. При этом в силу эффекта Гартмана-Шпренгера в каждом из резонаторов возбуждается пульсационный процесс, приводящий к нагреву компонентов топлива до высоких температур в застойных зонах соответствующих резонансных полостей. Через отверстия в торцевых поверхностях резонаторов истекают высокотемпературные компоненты топлива, которые перемешиваются и воспламеняются, инициируя рабочий процесс в ГВП.

В работе проведено расчетно-теоретическое исследование особенностей газодинамических и макрокинетических процессов в БСВ. Исследование основано на численном решении уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной среды с учетом химических реакций. Рассмотрены различные модели турбулентности и методы решения.

В результате получены оптимальные соотношения геометрических и режимных параметров, определены границы и времена задержки воспламенения, исследованы спектральные характеристики пульсационного процесса в БСВ на компонентах воздух+метан.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования БСВ для воздушно-метановой топливной смеси, что расширяет границы применения перспективных газодинамических резонансных систем в качестве устройств запуска ГВП.

САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЖРД

М.А. Яблочко

(«РКК «Энергия»)

e-mail: applemax@rambler.ru

В настоящее время в «РКК «Энергия» разрабатывается кислородно-керосиновый многофункциональный двигатель 11Д58МФ, предназначенный для использования в составе разгонного блока (РБ) нового поколения. Данный РБ впервые должен быть оснащён автономной системой управления двигателем, выполняющей функции системы диагностики и аварийной защиты (СДАЗ).

Для создания эффективной системы диагностики и аварийной защиты данного двигателя в силу специфики отработки и особенностей применения требуется новый подход к разработке алгоритмов диагностирования и аварийной защиты. В ходе работ, проводимых «РКК «Энергия» по бортовой СДАЗ двигателя перспективного РБ, был сформирован новый «адаптивный» подход к разработке алгоритмов диагностирования и аварийной защиты, который в перспективе может стать основой для создания самонастраивающихся систем.

Адаптивный подход предполагает самонастройку СДАЗ и контроль состояния двигателя во время его работы. Самонастройка СДАЗ – это сбор статистики работы ЖРД и вычисление предельных значений контролируемых параметров на выбранном интервале работы двигателя.

В представленной работе рассмотрена основная концепция построения адаптивных алгоритмов, рассмотрен пример подобного алгоритма и приведены основные преимущества и недостатки данного подхода относительно классического, основанного на сборе статистики аварийных или безаварийных испытаний ЖРД.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТА ОХЛАЖДЕНИЯ
КАМЕРЫ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МЕЖКАНАЛЬНОЙ
ТРАНСПИРАЦИЕЙ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА**

Ф.В. Пелевин, П.Ю. Семенов

***(Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана)***

e-mail: pelfv@rambler.ru

Для увеличения удельного импульса тяги кислородно-керосиновое разгонное ЖРД предлагается использовать в качестве охладителя жидкий кислород. Но потери давления в оребренном тракте охлаждения ЖРД достигают 7МПа. Для уменьшения гидравлических потерь предлагается использовать пористый тракт с межканальной транспирацией жидкого кислорода в наружной системе охлаждения.

На основании расчетов, выполненных по результатам экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и теплообмена в пористых трактах с межканальной транспирацией теплоносителя (МКТТ), установлено, что минимальная температура огневой стенки при потерях давления в регенеративном тракте охлаждения в 1-2 МПа устанавливается при расстоянии между каналами 8-10 мм (22 канала) и пористом сетчатом металле (ПСМ) из медной сетки. Толщина пористого сетчатого металла соответствует оптимальной высоте оребренного тракта (3-4 мм). Для достижения оптимальной толщины ПСМ пористость ПСМ по длине камеры 0,35-0,29. Варьирование пористостью ПСМ по длине камеры ЖРД приводит к выравниванию температуры огневой стенки по длине камеры и уменьшению термической деформации камеры. Низкие значения пористости ПСМ соответствуют высокой прочности пористого материала. Как показывают расчеты для увеличения прочности ПСМ можно использовать ПСМ из сетки 12X18H10T.

Пористый тракт с межканальной транспирацией теплоносителя открывает перспективы для создания безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД разгонных блоков (межорбитальных буксиров) с давлением в камере сгорания сто и более атмосфер, а также ЖРД с центральным телом.

РЕКУПЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ С КОМПЛАНАРНЫМИ КАНАЛАМИ ДЛЯ СИСТЕМЫ НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЖРД

С.А. Орлин, Ф.В. Пелевин

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

e-mail: pelfv@rambler.ru

Одним из необходимых условий создания компактного высокоэффективного теплообменного аппарата является высокая теплоотдача и низкий коэффициент гидравлического сопротивления.

Тракт с компланарными каналами перспективен для использования в компактных рекуперативных теплообменных аппаратах и в охлаждаемых лопатках газотурбинных авиационных двигателей. Тракт с компланарными каналами сочетает в себе два метода интенсификации теплообмена: 1 - увеличение турбулентности за счет закрутки потока, 2 - увеличение поверхности теплоотдачи. Исследования показали, что основным фактором, определяющим величину коэффициента теплоотдачи на участке стабилизированного теплообмена является угол взаимного пересечения компланарных каналов 2β .

Во всем исследованном диапазоне характер изменения коэффициентов гидравлического сопротивления сохраняет монотонность, в том числе и для области переходного течения в гладкой трубе. В трактах с компланарными каналами режим течения в диапазоне чисел Рейнольдса $(10^3 \dots 6) \cdot 10^4$ не претерпевает существенного изменения и является турбулентным. Область автомодельности коэффициента гидравлического сопротивления в тракте с компланарными каналами начинается при значениях числа $Re = (1 \dots 1,5) \cdot 10^4$. Чем большее значение принимает угол взаимного пересечения каналов 2β , тем выше темп увеличения ξ . При увеличении угла 2β от 45° до 104° коэффициент гидравлического сопротивления увеличивается в 5...6 раз.

Установлено влияние абсолютных размеров компланарных каналов на интенсификацию теплоотдачи. С уменьшением размеров каналов и ячеек смешения эффективность теплоотдачи уменьшается. Исследования эффективности теплообмена в трактах с компланарными кана-

лами и эквивалентными гидравлическими диаметрами 0,5...2 мм показали, что коэффициент теплоотдачи резко падает с уменьшением $d_{\text{ЭКВ}}$. При таких малых размерах каналов интенсификация теплоотдачи мала, а гидравлические потери существенны.

Эффективность теплообмена максимальна при угле 2β равном 90° .

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВЫХ ПОРИСТЫХ ТРАКТОВ
С МЕЖКАНАЛЬНОЙ ТРАНСПИРАЦИЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Д.А. Назин, В.П. Александрёнков

**(Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана)**

e-mail: nazin-da@mail.ru, aleks@power.bmstu.ru

Существуют различные методы тепловой защиты камеры жидкостного ракетного двигателя от воздействия высокотемпературных продуктов сгорания. Для того, чтобы полностью отказаться от внутреннего (завесного) охлаждения камеры, необходимо повышать эффективность охлаждения путём увеличения теплоотдачи в тракте охлаждения при невысоких затратах мощности на прокачку охладителя. Степень интенсификации теплоотдачи может быть оценена коэффициентом интенсификации – значением отношения полученного коэффициента теплоотдачи к его значению в эталонном случае в сходственных условиях.

Заполнение охлаждающего тракта пористым металлом даёт возможность интенсифицировать теплообмен в десятки и даже сотни раз. Однако с увеличением длины пористой вставки значительно возрастают затраты мощности на прокачку теплоносителя, что снижает эффективность пористого тракта. Гидравлические потери на прокачку теплоносителя могут быть оценены аналогично коэффициентом гидравлического сопротивления тракта.

В итоге применяемые методы интенсификации накладывают определённые ограничения на эффективность теплообмена.

В качестве перспективного варианта охлаждения камеры может рассматриваться применение пористого теплообменного тракта с межканальной транспирацией теплоносителя.

В данной работе экспериментальным методом получены теплогидравлические характеристики таких теплообменных трактов на различных режимах. Расчётным методом определены коэффициенты интенсификации и гидравлического сопротивления тракта. Установлена зависимость эффективности интенсификации теплоотдачи от относи-

тельных значений теплогидравлических характеристик. Проведена оценка тепловой эффективности тракта с межканальной транспирацией теплоносителя.

**СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ С ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ
ТЕЧЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ЭЖЕКТОРЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ**

Т.Д. Сафаргалиев, П.В. Папырин
**(Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана)**

E-mail: Tim_and_com.@rambler.com

В работе приведены результаты экспериментального и численного (в Ansys Fluent) исследования процессов в сверхзвуковом газовом эжекторе с цилиндрической камерой смешения (КС). Установлено удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных коэффициентов эжекции, предельных противодавлений на критических режимах, а также показано согласование расчетного и экспериментального распределения давления по длине КС и диффузору. По результатам численного моделирования показано, что торможение сверхзвукового потока смеси газов ввиду значительной неравномерности по числу Маха в поперечном сечении осуществляется в системе скачков уплотнения значительной протяженности, которая начинается при предельном критическом режиме от сечения запираания. По результатам численного моделирования течений в эжекторах с цилиндрической КС различной длины определена оптимальная длина КС удовлетворительно согласующаяся с экспериментом, а так же показано, что для коротких КС при определенных параметрах оптимальными могут быть докритические режимы работы.

**РАСЧЕТ И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИИ
РДМТ НА ГАЗООБРАЗНЫХ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА
КИСЛОРОД – ПРИРОДНЫЙ ГАЗ**

Д.А. Ягодников, О.А. Ворожеева
**(Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана)**

В настоящее время ракетные двигатели малых тяг (РДМТ) широко используются в летательных аппаратах в качестве исполнительных органов в системах коррекции, стабилизации и ориентации КА. Так как практически невозможно организовать регенеративное охлаждение

РДМТ в связи с их импульсным режимом работы и малыми расходами компонентов топлива, необходимо уделять большое внимание выбору материалов конструкции двигателя.

В работе рассмотрено математическое моделирование теплового состояния стенки РДМТ, работающего в импульсном режиме на компонентах топлива кислород – природный газ. Проведены тестовые расчеты температурного поля стенки модельного РДМТ для следующих вариантов конструкции:

1. Стенка выполнена из одного материала.
2. На стенку нанесено теплозащитное покрытие.
3. В сопловой части находится вкладыш.

В качестве материалов модельного двигателя рассматривались сталь 12Х18Н10Т, сплавы ХН60ВТ и БрХ0,8, УКМ и ниобий. В качестве теплозащитных покрытий рассматривались оксиды циркония, оксид алюминия и дисилицид молибдена. В качестве материала вкладыша рассмотрен ниобий.

При использовании различных теплозащитных покрытий на основе оксида циркония толщиной 100 мкм температура стенки из стали 12Х18Н10Т и сплава ХН60ВТ снизилась на 20...28%. Температура стенки из сплава БрХ0,8 снизилась на 22...34%. Температура стенки из УКМ снизилась на 15...23%. Температура стенки из ниобия снизилась на 33...44%. Наилучший результат получен для теплозащитного покрытия $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, нанесенного плазменным напылением.

При использовании теплозащитных покрытий из оксида алюминия и дисилицида молибдена толщиной 100 мкм температура стенки из стали 12Х18Н10Т, сплавов ХН60ВТ и БрХ0,8 и УКМ снизилась на 8...11%. Температура стенки из ниобия снизилась на 17%.

Применение вкладыша из ниобия в сопле РДМТ толщиной 1 мм привело к снижению температуры стенки из стали 12Х18Н10Т, сплавов ХН60ВТ и БрХ0,8 в среднем на 20%.

Полученные результаты позволяют подобрать оптимальные материалы элементов конструкции РДМТ для обеспечения удовлетворительного теплового состояния конструкции двигателя в целом.
