

УДК 539.422.5.

Системы теплозащиты конструкций комбинированного ракетно-прямоточного двигателя твердого топлива

Копылов А.В.^{1*}, Тихомиров М.А.^{1}, Мокрецова О.В.^{2***}**

¹*Машиностроительное конструкторское бюро «Искра» имени Ивана Ивановича Карпукова, МКБ «Искра, Москва, Ленинградский проспект, 35, 125284, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия *e-mail: alexcopylov@mail.ru*

***e-mail: mishata84@mail.ru*

****e-mail: moolia87@mail.ru*

Аннотация

В статье рассмотрены результаты разработки, изготовления и применения системы теплозащиты теплонапряженных конструкций комбинированного ракетно-прямоточного двигателя твердого топлива для авиационных управляемых ракет. Стойкость новых теплозащитных покрытий двигательной установки к эксплуатационным воздействиям подтверждалась результатами расчетного моделирования и испытаний конструктивно-подобных образцов.

Ключевые слова: система теплозащиты, ракетный прямоточный двигатель твердого топлива, наружные и внутренние эластичные теплозащитные покрытия, углерод-углеродные композиционные материалы с

поверхностным и объемным силицированием, углерод-керамические композиционные материалы.

В настоящее время использование комбинированного ракетно-прямоточного двигателя твердого топлива (КРПД-Т) для авиационных управляемых ракет (АУР) (рис. 1; 2) [1], по сравнению с ракетными двигателями твердого топлива (РДТТ), позволяет:

- обеспечить более высокое значение суммарного импульса тяги КРПД-Т, в частности, за счет повышения температуры продуктов сгорания газогенераторного топлива (продуктов газогенерации);
- использовать в КРПД-Т кислород атмосферного воздуха в качестве окислителя;
- увеличить дальность полета ракеты в 1,5...2 раза;
- осуществлять регулирование режима работы КРПД-Т для оптимизации характеристик двигательной установки на всех режимах работы в процессе полета АУР.

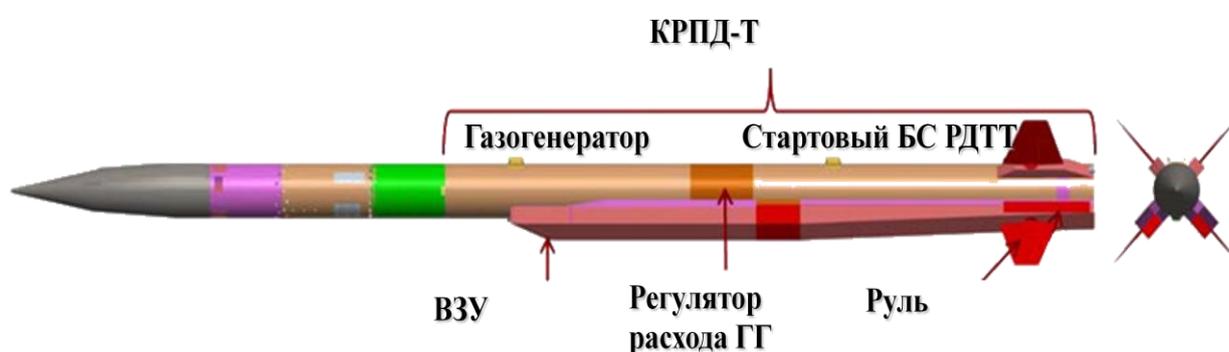


Рис. 1. Схема расположения КРПД-Т и его основных элементов в составе АУР



Рис. 2. Внешний облик АУР с КРПД-Т

Ориентировочные характеристики ракеты класса «воздух-воздух» с КРПД-Т приведены в таблице 1.

Таблица 1

Ориентировочные характеристики ракеты класса «воздух-воздух» с КРПД-Т

Скорость полета, М	Диапазон высот, км	Дальность полета, км	Длина ракеты, м	Масса ракеты, кг
0,8 ... 4,2	0 ... 20	≥ 100	~ 4	~ 200

Однако, для достижения высоких значений летно-баллистических, аэродинамических, высотно-скоростных, тягово-энергетических характеристик АУР с КРПД-Т и температуры (до 3000 К) продуктов сгорания топлива в КРПД-Т требуется обеспечить работоспособность теплонапряженных деталей и узлов двигательной установки, в том числе за счет применения новой системы теплозащиты из неметаллических композиционных материалов (КМ), термо-, эрозионно и -химически стойких к эксплуатационным воздействиям.

Основные элементы КРПД-Т, содержащие теплонапряженные конструкции и детали, представлены на рисунках 3 а-г и 4 [1; 2]. К данным конструкциям и деталям относятся: внутренняя и внешняя поверхность

корпусов бесплового РДТТ (БС РДТТ), газогенератора маршевого топлива; детали поворотного регулятора расхода топлива (РРТ) и РРТ с центральным телом - сопловые вставки, сопловой вкладыш, центральное тело (коронка).

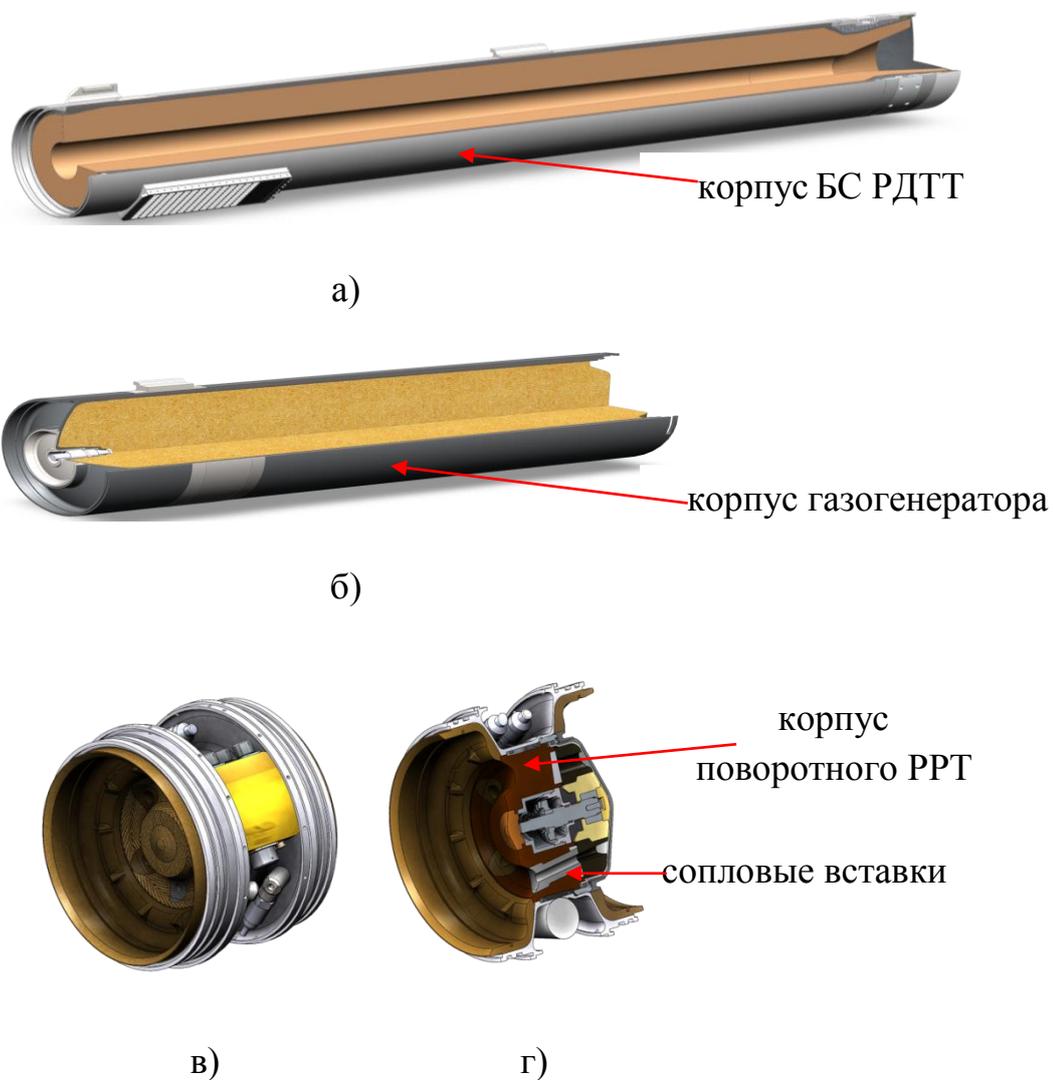


Рис. 3. Основные элементы КРПД-Т:

а) Конструкция стартового бесплового РДТТ (БС РДТТ); б) Конструкция газогенератора маршевого топлива; в) и г) Переходный отсек с регулятором расхода генераторного газа маршевого топлива, где: в) внешний облик; г) разрез.

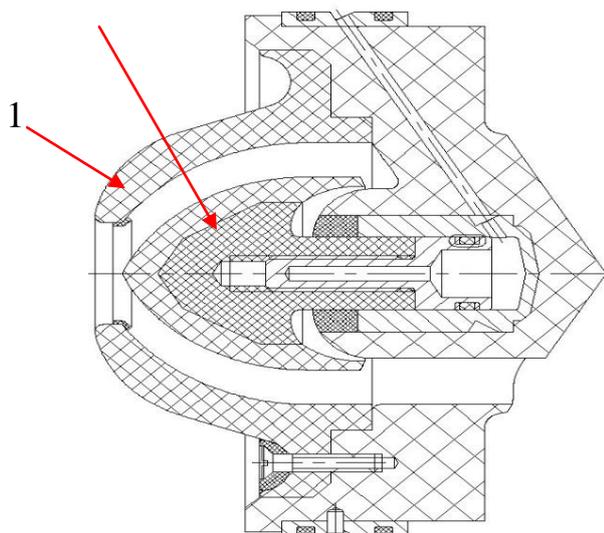


Рис. 4. Схема РРТ с центральным телом для регулирования продуктов

газогенерации в КРПД-Т, где:

1 - сопловой вкладыш из неметаллических КМ; 2 - центральное тело из неметаллических КМ

К параметрам эксплуатационного воздействия на внешние и внутренние поверхности силовых оболочек КРПД-Т и детали РРТ относятся:

- теплоэрозионное (теплоабразивное) и теплохимическое воздействие конденсированной твердой К-фазы, в частности, металлической фазы Al_2O_3 , образующейся в продуктах газогенерации, где размеры частиц (дисперсность) составляет до $50 \div 100$ мкм, что приводит без соответствующей теплозащиты к линейному уносу теплозащитного материала, например, углерод-углеродного КМ (УУКМ) (рис. 5);
- скорость обтекания потоком продуктов сгорания газогенераторного топлива - $M \sim 1,2$;

- внутрикамерное давление - $p \sim$ до $12 \div 15$ МПа;
- максимальные температуры частиц продуктов сгорания газогенераторного топлива - до 3000K и время работы КРПД-Т - до 200 с, характеризующие интенсивность (скорость) внутреннего высокотемпературного нагрева (теплообмена) потоком продуктов сгорания твердого топлива - до 1000 К/с;
- циклические теплосмены в процессе хранения при температурах - $\sim 45 \dots 71^\circ\text{C}$ - N;
- аэродинамический нагрев внешней поверхности корпуса КРПД-Т;
- окислительное воздействие на ТЗП в камере дожигания КРПД-Т при использовании воздуха в качестве окислителя, поступающего через воздухозаборное устройство (ВЗУ), что в отличии от РДТТ, является дополнительным фактором эксплуатационного воздействия.

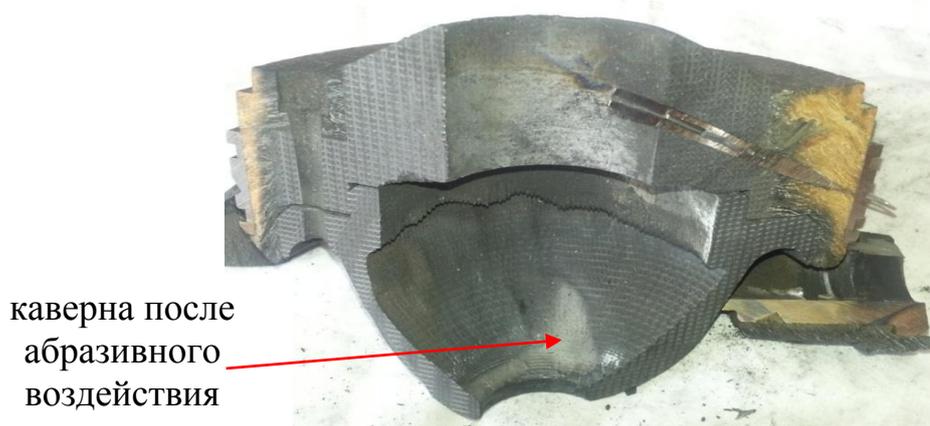


Рис.5. Фото теплоэрозионного (абляционного) уноса углеродного материала с внутренней поверхности, в частности, соплового вкладыша из УУКМ для РРТ с центральным телом без его соответствующей системы теплозащиты в результате абразивного воздействия конденсированной твердой К-фазы

В работе проведены исследования с использованием модуля FLUENT программного комплекса ANSYS численные исследования по моделированию теплового состояния теплонапряженных элементов КРПД-Т (элементов камеры дожигания и соплового блока) в истекающей струе продуктов сгорания и примыкающем участке атмосферы, в режиме автономного полета (рис. 6-10). Примыкающий участок атмосферы необходим для учета внешнего обтекания воздушным потоком (аэродинамический нагрев) корпуса КРПД-Т. Общий вид расчетной области представлена на рис.6 [1]. Для проведения численного моделирования в пределах данной расчетной области была сформирована структурированная сетка (с использованием модуля ICEM ANSYS). Общее количество контрольных объемов составило более 2,5 млн. В соответствии с исходными данными рассматривались два основных режима автономного полета изделия: высота $H=8$ км, скорость $M=2,6$ (801 м/с), время полета 120 с («режим Н8»); высота $H=20$ км, скорость $M=4,2$ (1239 м/с), время полета 185 с («режим Н20»).

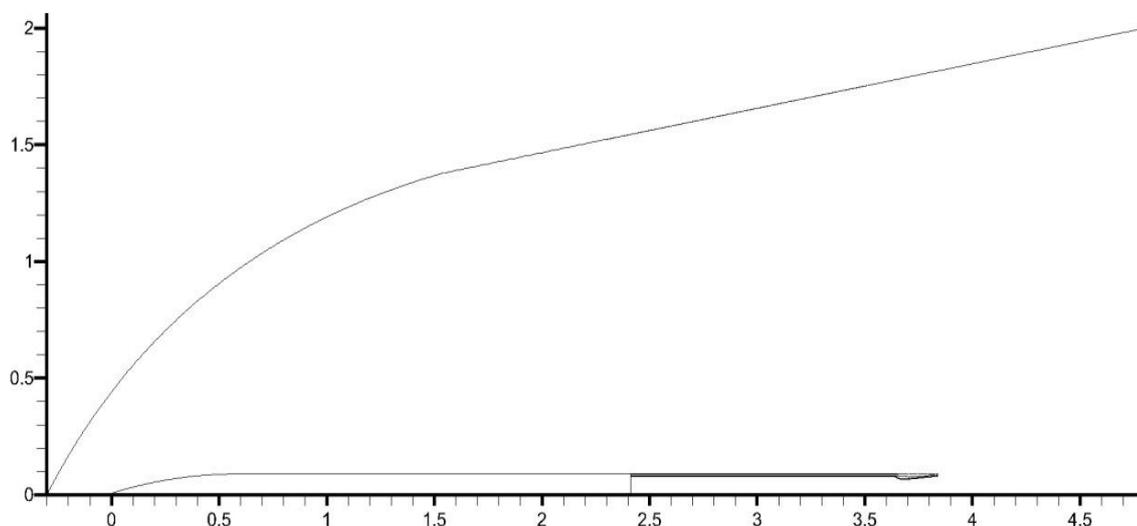


Рис.6. Общий вид расчетной области (размеры в метрах)

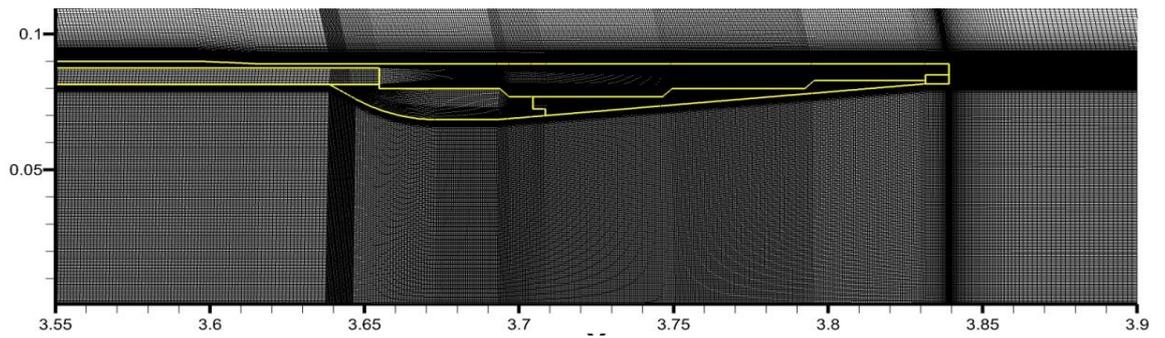
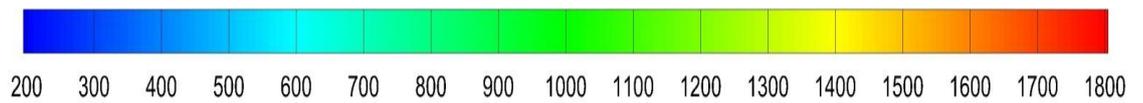
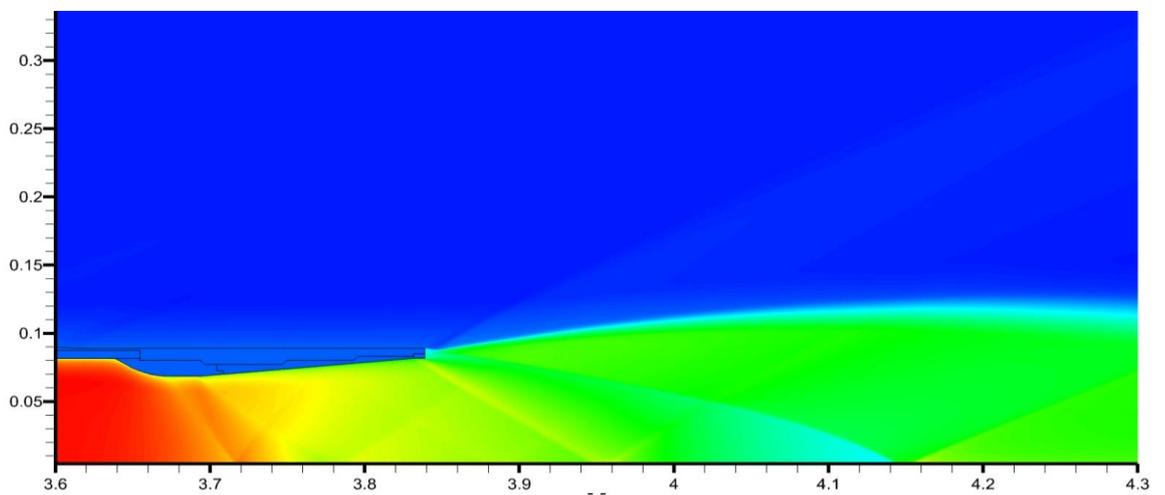


Рис. 7. Участок расчетной области, включающий камеру дожигания и сопловой блок (размеры в метрах) КРПД-Т, со структурированной расчетной сеткой, где желтым цветом выделены контуры конструктивных элементов

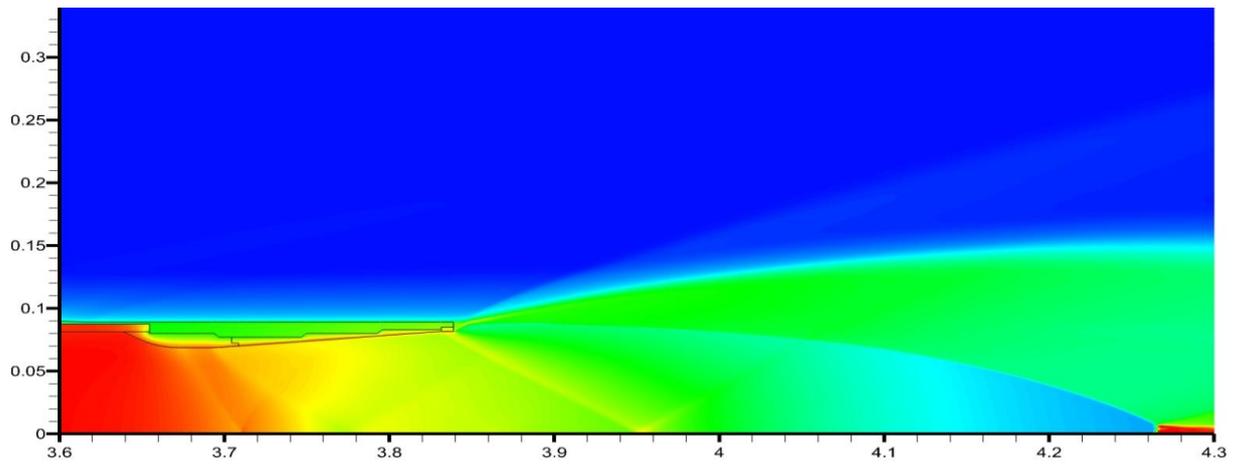
камеры и соплового блока



а)



б)



в)

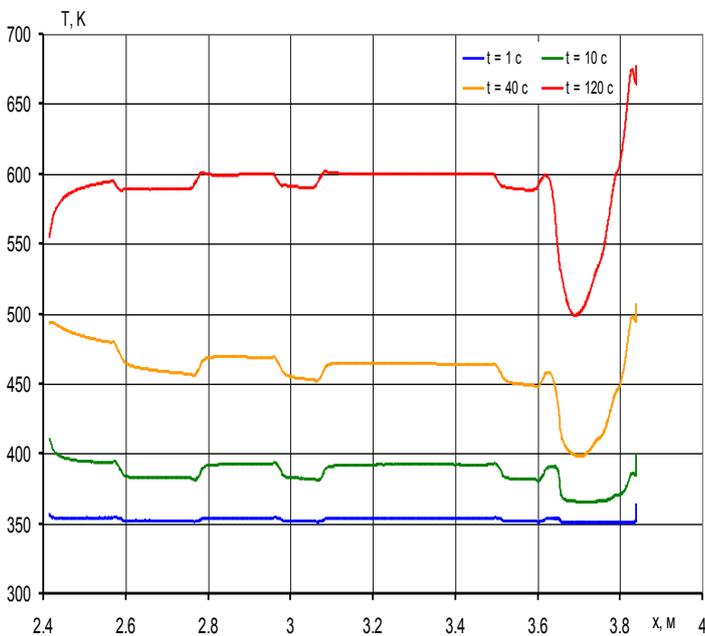
Рис.8. Поля статической температуры газа, К, при истечении из сопла

КРПД-Т, где:

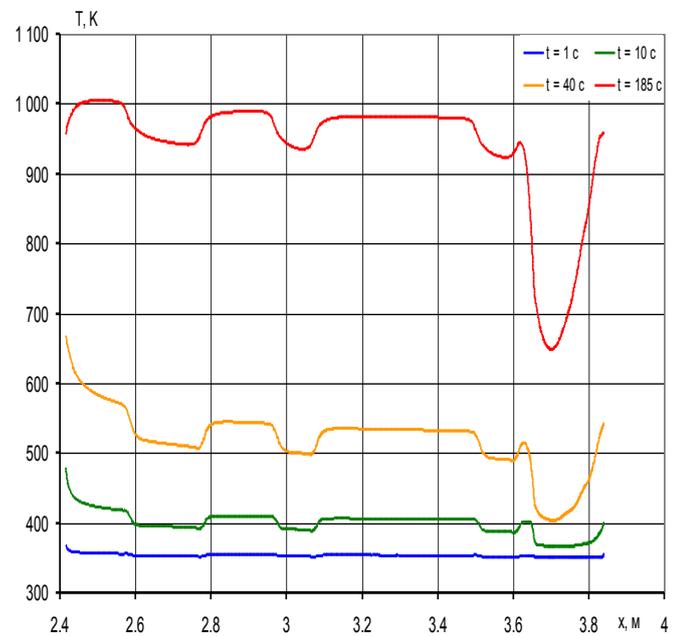
а) цветовая гамма температур; б) распределение температурного поля на

автономном режиме полета на высоте 8км (Н8); в) распределение

температурного поля на автономном режиме полета на высоте 20км



а)



б)

Рис. 9. Распределение температуры на наружной поверхности корпуса

КРПД-Т, в частности, наружные поверхности камеры дожигания (КД)и

соплового блока, в различные моменты времени для обоих режимов, где:

а) высота 8 км (режим Н8); б) высота 20 км (режим Н20)

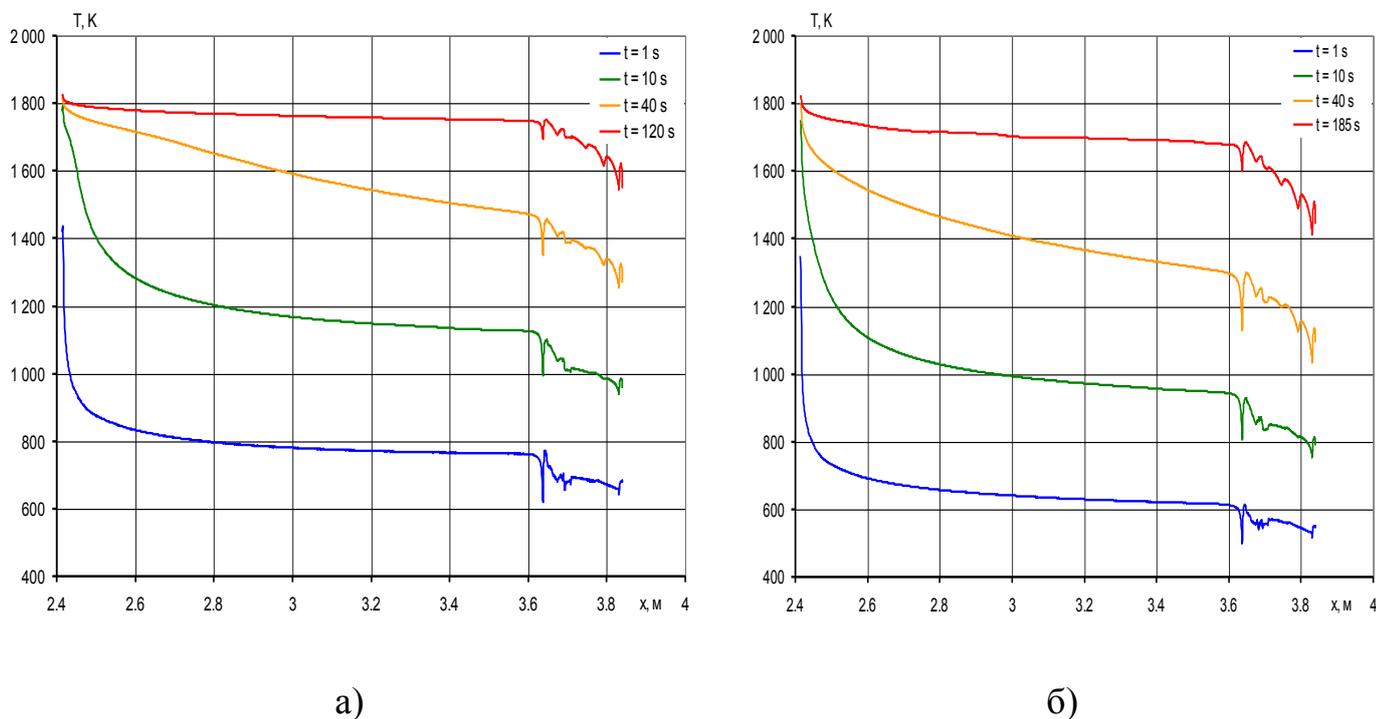


Рис. 10. Распределение температуры на внутренней поверхности КД и

соплового блока в различные моменты времени, где

а) высота 8 км (режим Н8); б) высота 20 км (режим Н20)

Учитывая весь спектр эксплуатационного воздействия повышаются требования к системе теплозащиты. В настоящее время в серийном производстве несущий корпус КРПД-Т выполнен из металлических конструкционных материалов, в частности, из жаропрочной стали КВК-32, применение неметаллических КМ в силовых корпусах КРПД-Т сдерживается по условиям прочности, в частности, ударной прочности, газопроницаемости и т.д. При воздействующих внешних и внутренних тепловых потоках, эквивалентных условиям полёта ракеты на высоте $H=20$ км и $M=4$,

температура на корпусе КРПД-Т может достигать ~ 3000 К. Данная температура существенно превышает температуру плавления жаропрочной стали КВК-32, что приведет к разрушению несущего корпуса КРПД-Т.

Для внутренней поверхности корпуса КРПД-Т, деталей проточного тракта КРПД-Т были разработаны следующие системы теплозащиты конструкций КРПД-Т (рис. 11):

- система теплозащиты с повышенной термоэрозионной прочностью для газогенератора и камеры сгорания КРПД-Т в условиях воздействия высокоскоростных (до 400 м/с) и высокотемпературных потоков продуктов сгорания, выполненная в виде эластичных абляционных внутренних ТЗП «Искрин-1», «Искрин-2», состоящих из армирующего наполнителя (тканей, волокон) и полимерного связующего. Эффект теплозащиты состоит в том, что под воздействием высоких температур полимерное фенол-формальдегидное связующее начинает разрушаться. Данный процесс сопровождается поглощением тепла за счёт эндотермического эффекта реакции разложения компонентов ТЗП с последующим выносом потоком продуктов газогенерации, что делает ТЗП термостойким, а его унос управляемым;
- система теплозащиты деталей проточного тракта КРПД-Т в виде жестких ТЗП из композиционных волокнистых прессматериалов (стеклотекстолиты АГ-4В, АГ-4С, П-5-2М, ПСК, П-5-7, гибридный углестеклотекстолит ТЗУ-2ПС);

- система теплозащиты деталей проточного тракта КРПД-Т, в частности, регулятора расхода топлива (РРТ), выполненная в виде углерод-углеродных КМ (УУКМ) с защитными керамическими покрытиями, наносимыми поверхностным силицированием или УУКМ с частичным введением карбида кремния в объем или УУКМ с объемным силицированием, что позволяет получить деталь из углерод-керамического КМ (УККМ).

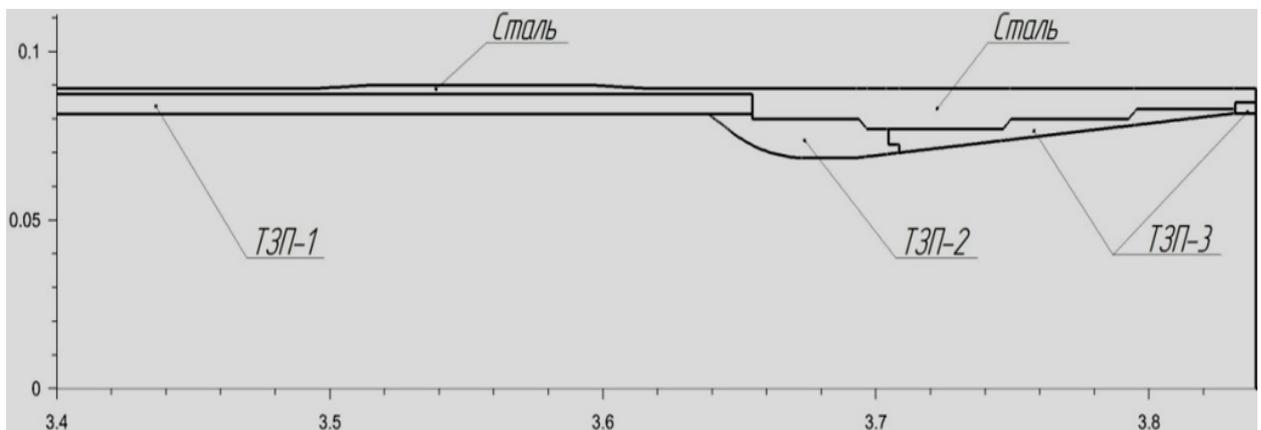


Рис. 11. Фрагмент системы теплозащиты внутренней поверхности камеры дожигания КРПД-Т, где:

ТЗП-1 - эластичное ТЗП «Искрин-1» или «Искрин-2»; ТЗП-2 и ТЗП-3 - жесткие ТЗП - волокнистые прессматериалы, являющиеся также деталями проточного тракта КРПД-Т.

Для подтверждения теплозащитных функций внутреннего ТЗП "Искрин-2" в работе проведены высокотемпературные испытания конструктивно-подобных образцов (рис.12) из материала "Искрин-2" при моделировании нагрева, эквивалентного эксплуатационному нагреву в КРПД-Т, в частности в камере дожигания.

Условия и режимы тепловых испытаний (табл. 1):

- постоянный по времени тепловой поток q , менявшийся от испытания к испытанию, задавался эквивалентным натурным условиям внутреннего теплообмена (теплоподвода) в КРПД-Т;
- образцы из материала "Искрин-2" находились в воздушной среде (моделирование окисления, как в камере дожигания).

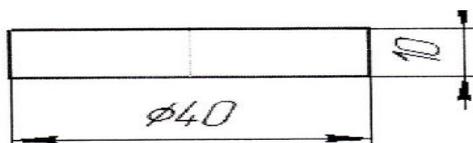


Рис. 12. Конструктивно-подобные образцы ТЗП из материала "Искрин-2"

Режимы тепловых испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы тепловых испытаний конструктивно-подобных образцов из материалов марки "Искрин-2"

№ образцов	Мощность источника, кВт	Диаметр луча на образце, мм	Тепловой поток q , кВт/м ²	Ожидаемая температура на передней поверхности образца, К	τ , сек
1	0,2	35	208	1460	300
2	0,4		416	1740	
3	0,5		520	1840	
4	0,6		624	1930	
5	0,7		728	2000	

6	0,8		832	2070
7	0,9		936	2130
8	1,0		1040	2190
9	1,2		1248	2290
10	1,3		1352	2340
11	2,0		2080	2600

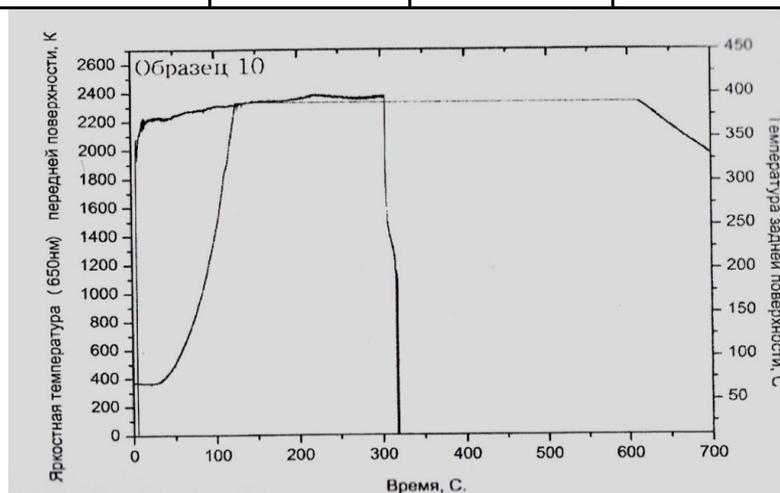


Рис. 13. Пример термограммы внутреннего ТЗП «Искрин - 2», характеризующей интенсивность (скорость) внутреннего высокотемпературного нагрева - dT/dt

Результаты испытания на примере образца №10, где массы до испытаний m_0 - 15,092 г, после испытания m_k - 10,605 г, показал что изменение (потеря) массы материалом "Искрин - 2" при его термической деструкции от нагрева составила $\Delta m = m_0 - m_k = 15,092 - 10,605 = 4,487$ г (~ 30%), что является более, менее допустимым уровнем для области максимальных температур до 2400К. По ГОСТ-у на термостойкость: потеря массы должна составлять - 20÷30%.

Далее были проведены тепловые испытания, приближенных к натурным, конструктивно-подобных образцов внутреннего ТЗП из материала «Искрин-2» (рис. 14) на индукционном плазматроне в высокоэнтальпийных газовых потоках (рис. 15 а,б) с моделированием высокотемпературного нагрева - 2300 К, скорости М и внутрикамерного давления - 300 ГПа потока продуктов сгорания топлива. Графические зависимости параметров управления режимами плазматрона от времени приведены на рис. 16.

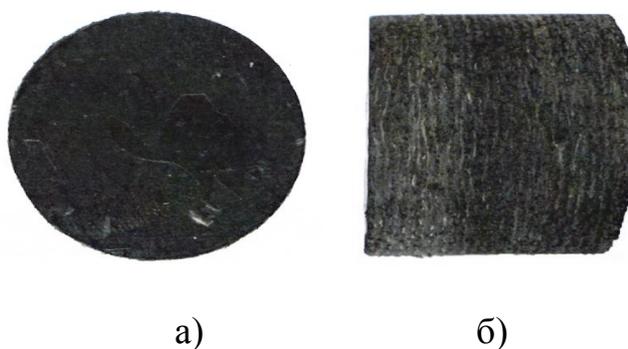


Рис. 14. Фото поверхности цилиндрического образца из теплозащитного материала «Искрин-2» до испытаний, где:

а) лицевая поверхность; б) боковая поверхность

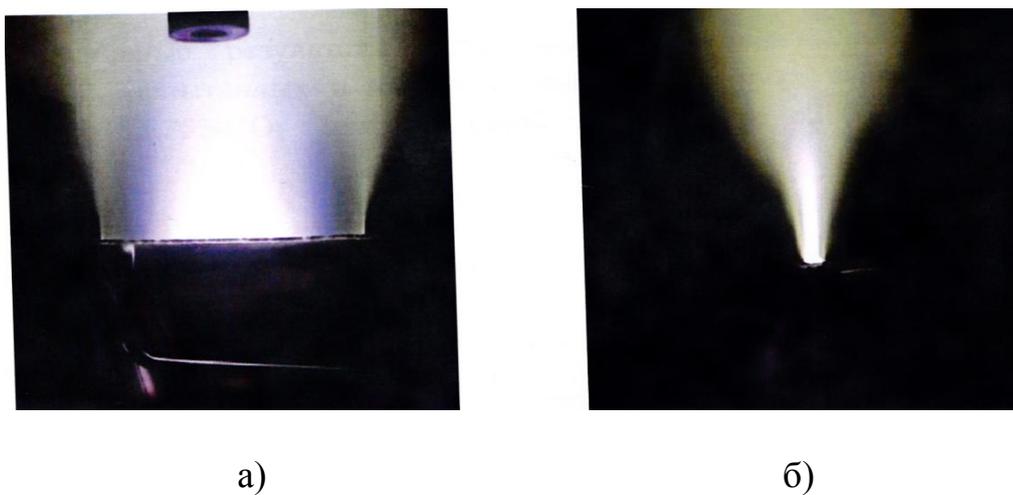


Рис. 15. Струя высокоэнтальпийного воздуха, истекающая из щелевого сопла:

а) вид спереди; б) вид сбоку

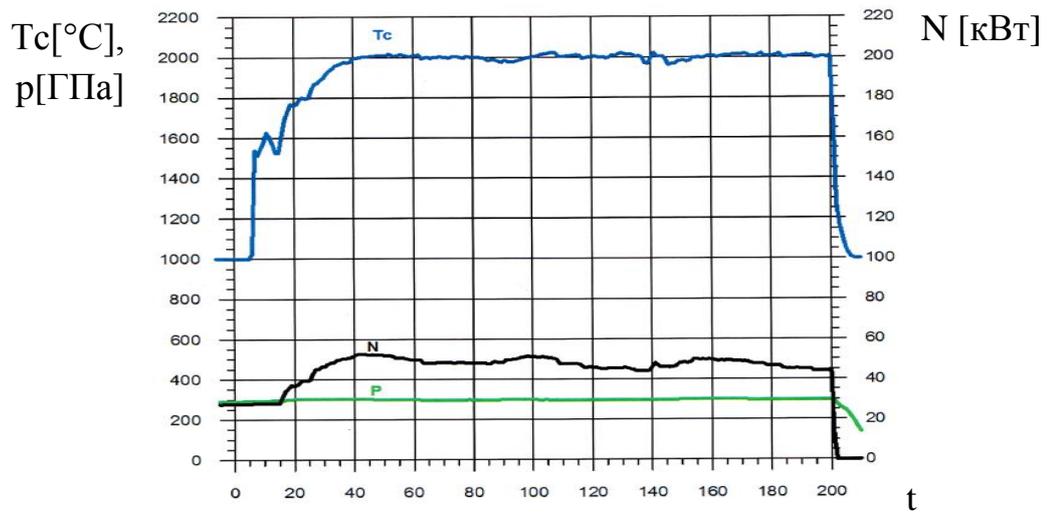


Рис. 16. Зависимости от времени t мощности N анодного питания ВЧ

генератора, давления p в барокамере и цветовой температуры T_c

Термоизображение образца из теплозащитного материала «Искрин-2»

приведено на рис. 17.

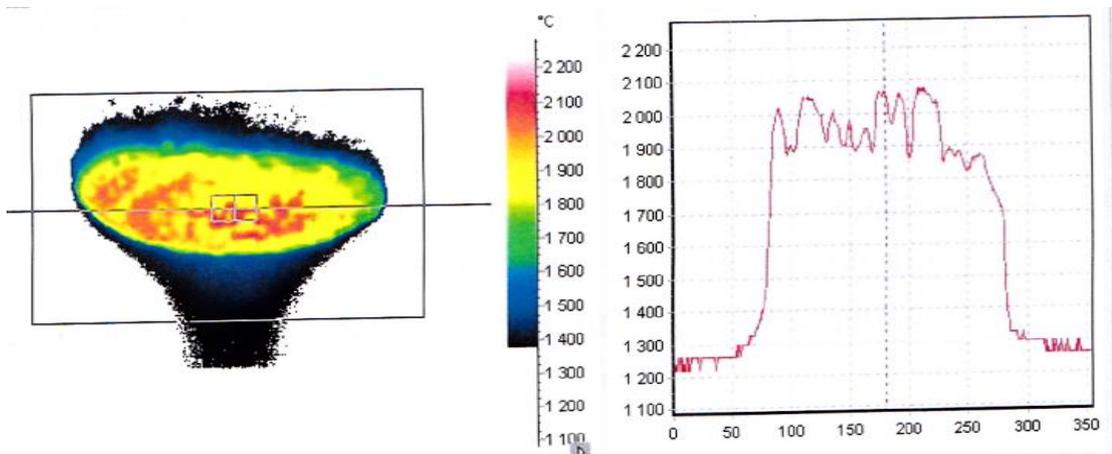


Рис.17. Термоизображение образца из теплозащитного материала

«Искрин-2» на 200-й секунде испытания

Фото поверхности цилиндрического образца из теплозащитного материала «Искрин-2» после одного испытания (рис. 18). Выявлено, что лицевая поверхность образца после испытания на плазматроне существенно

разнотонная, где пленка стекла на поверхности имеется на периферии за счет взаимодействия кислорода с антиокислительной добавкой из карбида кремния SiC и с кремнеземной тканью из SiO₂ (рис. 19), а в центральной области прококсованный материал оголен. На фотографии боковой поверхности (см. рис. 18) выявлено, что наиболее прогретая часть образца, примыкающая к лицевой поверхности, допустимо увеличилась в размерах не только в осевом, но и в радиальном направлении.



Рис. 18. Фото поверхности цилиндрического образца из внутреннего теплозащитного материала «Искрин-2» после испытаний, где:

а) лицевая поверхность; б) боковая поверхность



Рис. 19. Структура ТЗП "Искрин" и клеевое соединение ТЗП с корпусом КРПДТ с одной стороны и с защитно-крепящим слоем с другой стороны

Изготовленные ТЗП "Искрин" в корпусе КРПД-Т приведены на рис. 20.

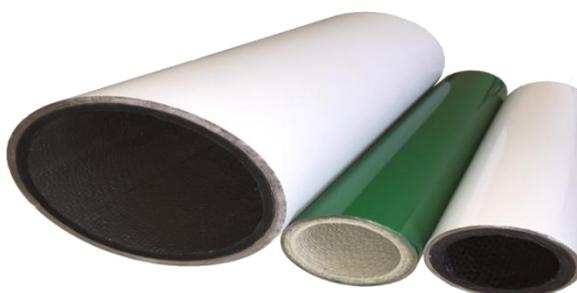


Рис. 20. Внешний вид образцов ТЗП Искрин-2, Искрин-1 и УТФКЛ-2, изготовленные в натуральных металлических корпусах газогенераторов и камеры дожигания и служащие облицовочным слоем для защиты внутренней поверхности корпусов КРПД-Т

Результаты испытаний массового уноса ΔM и теплового расширения ΔL конструктивно-подобных образцов внутреннего ТЗП из материала «Искрин-2» представлены в таблице 2. Все значения параметров уноса не превышают граничных значений.

Таблица 2

Результаты испытаний внутреннего ТЗП из материала «Искрин-2»

№ п/п	Газовая среда	Расход газа, G [г/с]	Нап, кВт	Угол атаки, °С	τ , с	M_0 , г	ΔM , г (%) - массовый унос	ΔL , мм (тепловое расширение)
1	86,25%N ₂ + 13,75 CO ₂	2,4	28÷42	15	200	71,82	11,59 (16,1)	+3,5

Получены результаты по снижению температуры от воздействия аэродинамического нагрева на внешнюю поверхность корпуса КРПД-Т, достигаемые за счет системы теплозащиты в виде наружного ТЗП (рис. 21).

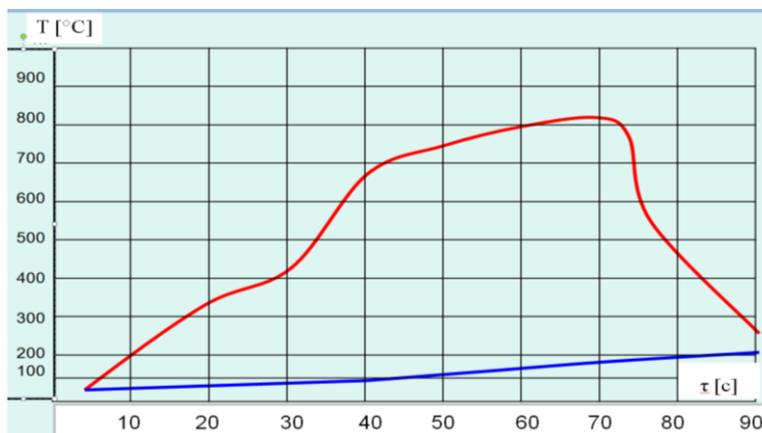


Рис. 21. Изменение температуры внешней поверхности корпуса КРПД-Т от времени при воздействии аэродинамического нагрева, где:

- а) красный цвет - температура без наружного ТЗП; б) синий цвет - снижение температуры от аэродинамического нагрева при использовании наружного ТЗП

Системы теплозащиты были выполнены в виде наружного ТЗП сублимирующего типа на основе органических (хлорсульфированный полиэтилен, латексы) или кремнийорганических связующих с наполнителем из пробки или фенольных, стеклянных, углеродных микросфер.

Учитывая перечисленные выше факторы эксплуатационного воздействия на детали теплонапряженных конструкций в проточном тракте КРПД-Т, особое место занимает наиболее теплонапряженные детали регулятора расхода топлива (РРТ), как поворотного, так и с центральным телом (см. рис. 3, 4). Данные детали, в отличие от других, испытывают

комплексное воздействие - максимальное тепловое, эрозионное (абразивное) и химическое воздействие конденсированной твердой К-фазы (табл. 3), что приводит к мгновенному разрушению (см. рис. 5).

Традиционные системы теплозащиты на основе традиционных жаропрочных конструкционных материалов - металлов, металлических покрытий, полимерных КМ таких, как стеклопластики углепластики, легко смачиваются продуктами газогенерации (табл. 3) [1] и не предотвращают зашлаковку поперечных сечений сопловых отверстий РРТ из-за налипания К-фазы (рис. 22; 23). С позиции энергетического закона в соответствии с уравнением Юнга полнота смачивания расплава конденсата продуктов газогенерации зависит от соотношений поверхностных энергий на трех межфазных границах: конденсат-воздух ($\gamma_{кв}$), смачиваемые поверхности (подложки) - воздух ($\gamma_{пв}$) и конденсат - металлическая подложка (подложки) ($\gamma_{кп}$): $\cos \theta = (\gamma_{пв} - \gamma_{кп}) / \gamma_{кв}$. Угол смачивания θ К-фазы оказался меньше 90° (рис. 23), то есть $\cos \theta > 0$, что привело к налипанию продуктов К-фазы на поверхность соплового отверстия.

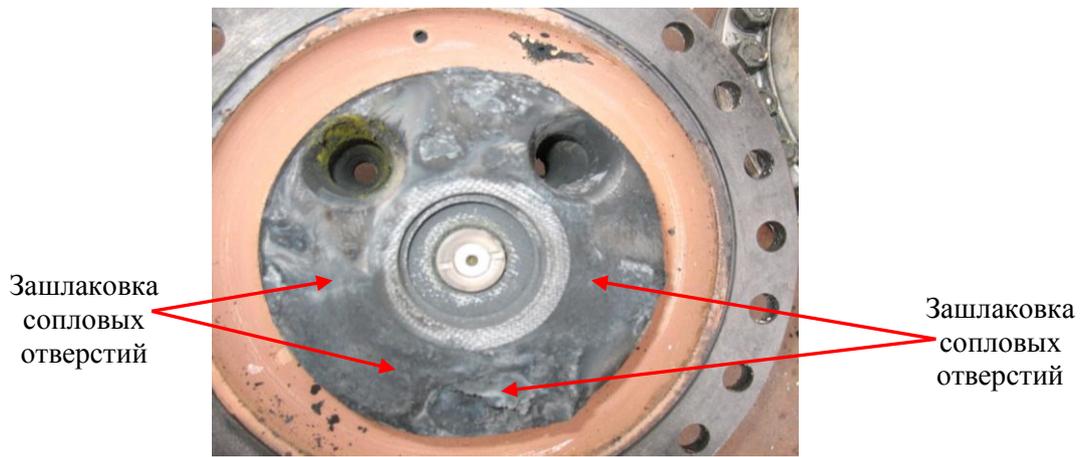


Рис. 22. Зашлаковка сопловых отверстий узла регулирования со стороны газогенератора КРПД-Т из-за налипания К-фазы после огневого стендового испытания

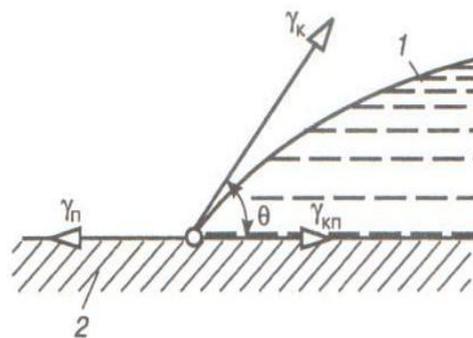


Рис. 23. Процесс смачивания продуктами газогенерации металлической поверхности где: 1 - расплав продуктов газогенерации; 2 - поверхность детали в проточном тракте

Таблица 3

Предварительный состав продуктов сгорания топлива номинального состава в мольных долях для газообразных продуктов и в массовых долях для конденсированных продуктов

Компоненты продуктов сгорания	$P_k = 40 \text{ кгс/см}^2$	$P_a = 1 \text{ кгс/см}^2$
H	0.0004	0.0001
H ₂	0.5923	0.6441

H ₂ O	0.0005	0.0001
HCl	0.0540	0.0741
N ₂	0.0001	-
CO	0.2736	0.2492
CH ₃	0.0001	
CH ₄	0.0045	0.0004
C ₂ H ₂	-	0.0001
C ₂ H ₄	0.0001	-
HCN	0.0002	-
BO	0.0002	-
B ₂ O ₂	0.0172	0.0056
B ₂ O ₃	0.0032	0.0008
BH ₃	0.0001	-
HBO	0.0200	0.0072
HBO ₂	0.0057	0.0016
BH ₃ O	0.0002	-
H ₃ B ₃ O ₃	0.0005	0.0001
BCl	0.0013	0.0006
BCl ₃	0.0002	0.0003
CIBO	0.0030	0.0020
BH ₂ Cl	0.0010	0.0002
BHCl ₂	0.0016	0.0009
Cl ₂ BON	0.0001	-
AlCl	0.0030	0.0007
AlCl ₂	0.0063	0.0021
AlCl ₃	0.0063	0.0058
AlHCl ₂	0.0001	-
AlBO ₂	0.0004	-

FeCl	0.0002	0.0001
FeCl ₂	0.0025	0.0038
C (конд.)	0.0576	0.0727
B ₂ O ₃ (конд.)	0.0833	0.1358
BN (конд.)	0.0836	0.0838
B ₄ C (конд.)	0.2624	0.2607
Al ₂ O ₃ (конд.)	0.0919	0.1028
Fe ₃ C (конд.)	0.0081	0.0065

Также по тепловым расчетам максимальная плотность теплового потока q , например, в поворотном РРТ (рис. 24) на поверхности сопел подачи продуктов газогенерации составила $2,5 \text{ МВт/м}^2$ (достигает в момент времени $t=1 \text{ с}$) при времени воздействия 200 с . Максимальная плотность теплового потока q на внутренней поверхности камеры дожигания КРПД-Т составляет $\sim 0,4 \text{ МВт/м}^2$ при времени воздействия с 1 по 3 с на высотах 8 и 20 км . Максимальная плотность теплового потока q на внутренней поверхности соплового блока КРПД-Т составляет $0,16 \div 0,23 \text{ МВт/м}^2$ при времени воздействия с 1 по 3 с . Максимальная плотность теплового потока q на наружной поверхности корпуса РПДТ составляет $0,06 \text{ МВт/м}^2$ в течении 1 с на высоте 8 км и $\sim 0,1 \text{ МВт/м}^2$ в течении 10 с на высоте 20 км . В момент времени $t=1 \text{ с}$ максимальная плотность теплового потока от газа в стенки поворотного РРТ со стороны газогенератора и камеры дожигания составляет $\approx 0,6 \text{ МВт/м}^2$. Общее время воздействия теплового потока - 200 с . Из-за высокой продольной теплопроводности углеродных волокон сопловая

вставка (поз. 14) из УУКМ нагревается и происходит интенсивный теплообмен на границе раздела сопловая вставка из УУКМ - корпус из П-5-2М (поз. 10) [1].

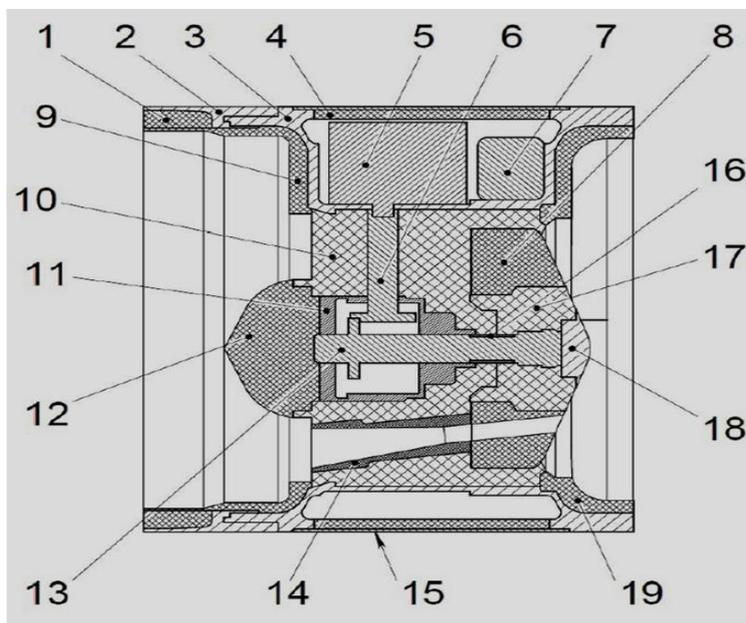


Рис. 22. Основные элементы поворотного регулятора расхода маршевого топлива стоящих в потоке продуктов газогенерации, где:

10 - корпус регулятора из стеклотекстолита П-5-2М; 14 - сопловая вставка (сопла подачи продуктов газогенерации) из УУКМ

Для создания термостойкой и отгаливающей поверхности для К-фазы разработана системы теплозащиты для деталей поворотного регулятора расхода продуктов газогенерации (сопловые вставки, заслонки) и регулятора с центральным телом (центральное тело, сопловой вкладыш) в виде напыляемых керамических или керамоподобных элементов из карбид или нитрид кремния SiC , Si_3N_4 на поверхность в виде покрытия или в объем деталей КРПД-Т из углерод-углеродного композиционного материала

(УУКМ). Также разработана теплозащита с усовершенствованной технологией изготовления: УУКМ марки "МКУ" на основе стержней из углеродной нити диаметром 0,7 мм с четырехнаправленной схемой армирования, уплотненный графитированной пеко-коксовой матрицей, с карбидокремниевым покрытием толщиной $100\div 250$ мкм, наносимым тройным силицированием (рис. 23) на поверхности деталей РРТ по следующей схеме: жидкофазное силицирование поверхности детали с образованием поверхностного подслоя SiC; нанесение слоя пиролитического карбида кремния методом химического осаждения из газовой фазы метилсилана; повторное жидкофазное силицирование УУКМ.



Рис.23. Микроструктура карбидокремниевого покрытия SiC, нанесенного тройным силицированием на детали регулятора из УУКМ марки "МКУ" (100 кратное увеличение), где:

1 - углеродная подложка; 2 - покрытие из карбида кремния

Данное карбидокремниевое покрытие, обладая относительно высокой твердостью по Бринеллю, обеспечивало защиту поверхности углеродной подложки от абразивного воздействия металлизированных компонентов продуктов газогенерации (табл.4) [3-5].

Таблица 4

Твердость различных материалов, применяющихся, как в конструкции регулятора, так и находящихся в потоке продуктов газогенерации

Материал, применение	Твердость по Бринеллю, МПа
Промышленный углерод (подложка)	150
Al (продукт сгорания)	200
MgO (продукт сгорания)	700
Al ₂ O ₃ (продукт сгорания)	21000
SiC (покрытие) для УУКМ	28000

На конструктивно-подобных образцах с системой теплозащиты из УУКМ с карбидокремниевым покрытием SiC были проведены высокотемпературные испытания на экспериментальной установке (рис. 24 а-в) с моделированием высокоинтенсивных тепловых потоков продуктов газогенерации, где нагревающий трубчатый нагреватель (рис. 24. а), в который помещается модельный образец, выполнен из УУКМ с карбидокремниевым покрытием SiC, а не из металла, что обеспечивает чистоту в высокотемпературных испытаниях модельных образцов из углеродсодержащих КМ (рис. 25). Для обеспечения высокоинтенсивных тепловых потоков нагреватель из УУКМ вставлялся в усовершенствованный токоподвод (рис. 26) [6], что позволило задавать высокие значения параметров теплового воздействия и получать высокие температуры,

скорости нагрева (рис. 27; табл. 5), эквивалентные эксплуатационному нагреву.

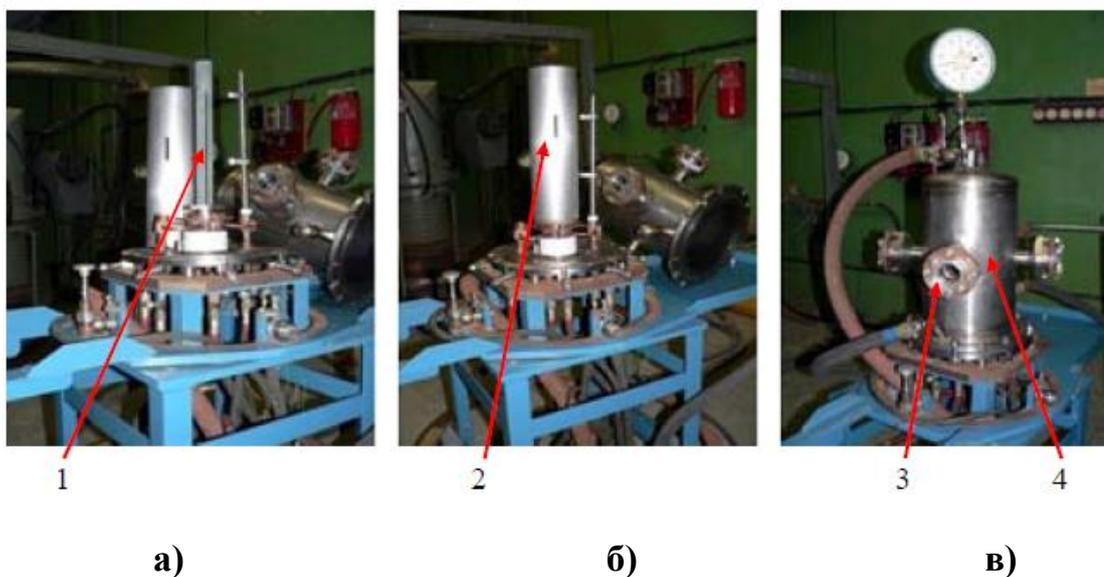


Рис. 24. Фотографии стадии сборки экспериментальной установки по высокотемпературным испытаниям на стойкость системы теплозащиты к высокоинтенсивным тепловым потокам, где основные элементы, где: 1 - нагреватель из УУКМ с покрытием SiC; 2 - экраны из молибденовой фольги с прорезью; 3 - смотровое окно для измерения температуры пирометром или тепловизором; 4 - рабочая камера

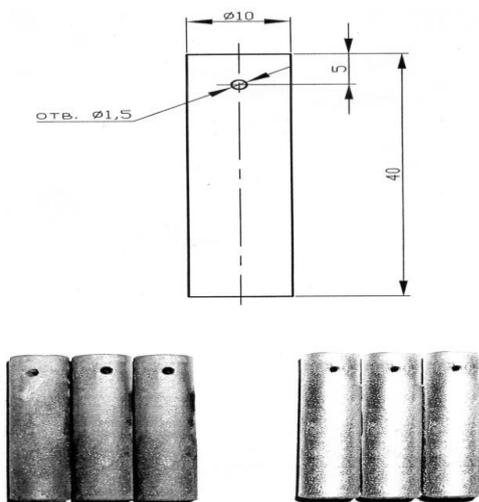


Рис. 25. Модельные образцы из углеродсодержащих КМ

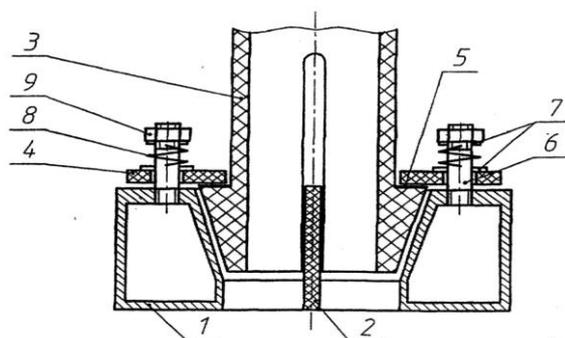


Рис. 26. Токоподвод к нагревателю из углерод-углеродных КМ для обеспечения высокой скорости косвенного нагрева и получения высоких экспериментальных температур, где:

1 - токоподводящая водоохлаждаемая труба, выполненную в виде двух полуколец; 2 - распорная электроизолирующая пластина; 3 - нагреватель из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ); 4 - графитовые упоры; 5 - кольцевая площадка нагревателя; поджимной механизм: 6 - шпилька; 7 - шайба; 8 - пружина; 9 - поджимаемая гайка к нагревателю для обеспечения высокой скорости нагрева и получения высоких экспериментальных температур.

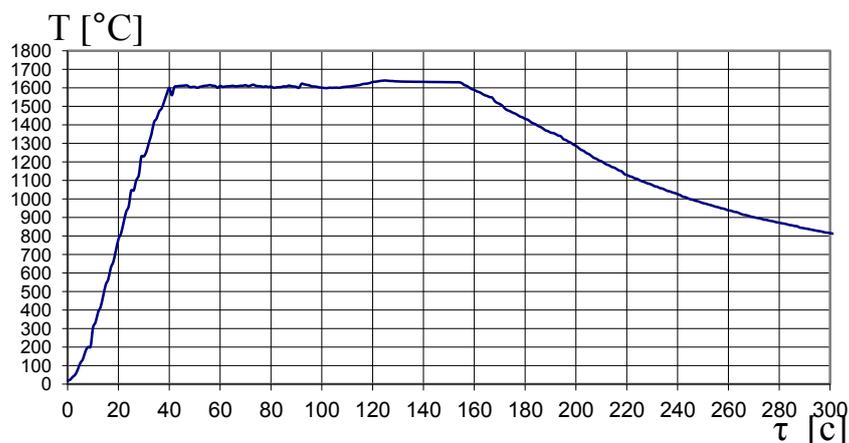


Рис. 27. Температурно-временная зависимость $T(\tau)$ одного цикла теплового нагружения модельного образца из УУКМ типа C/Si₃N₄

Таблица 5

Условия по высокотемпературным термоциклическим испытаниям

модельного образца из углеродсодержащих КМ

Ток I, [А]	Напряжение U, [В]	Температура Т, [К]	Р, [МПа]	Длительность выдержки на стационарном режиме τ , [с]	Общее время испытания
300	33	1870	До 12	120	300 сек

Модельный образец из УУКМ без соответствующей системы теплозащиты при воздействии высокоинтенсивного теплового потока подвергся разрушению на слои (рис. 28).

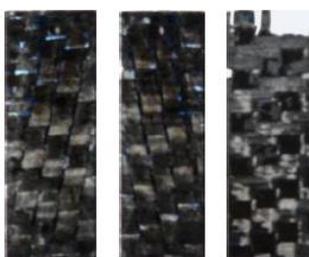


Рис. 28. Фото поверхности внутренних слоёв модельного образца из углеродсодержащего КМ без системы теплозащиты, разрушенного по плоскости расслоения, после одного высокотемпературного испытания

Модельный образец с системой теплозащиты УУКМ с объемным и поверхностным насыщением карбидом кремния при толщине покрытия SiC ~ 100 мкм (рис.29) выдержал десять циклов теплосилового нагружения при воздействии высокоинтенсивного теплового потока, где потеря массы

образца составила 0,01 г при массе образца до испытаний $m_{обр} = 5,4134$ г, а после десяти испытаний: $m_{обр} = 5,4124$ г.

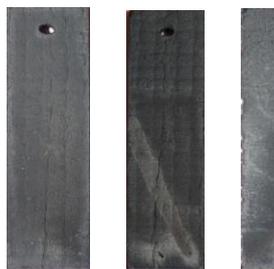


Рис. 29. Фото передней, тыльной и профильной поверхностей модельного образца с системой теплозащиты из УУКМ с объемным и поверхностным насыщением карбидом кремния при толщине покрытия SiC ~ 100 мкм после десяти циклов нагружения

Для анализа величины термических напряжений в системе теплозащиты, в частности, на границе защитное карбидокремниевое покрытие - углеродная подложка, возникающих от высокоинтенсивного теплового потока, предложена эмпирическая зависимость, которая учитывает формы деталей «горячей частей» КРПД-Т:

$$\sigma_T = \frac{E_p E_{подл} \Delta T (\alpha_{подл} - \alpha_p)}{E_{подл} + 2E_p (\delta_p / \delta_{подл})}, \text{ где } \sigma_T \text{ [МПа]} - \text{ величина термических напряжений}$$

модельного образца в виде пластины или цилиндра при разности температур ΔT [°C] получения $T_{пол}$ [°C], которая известна из технологической схемы изготовления композитов, и испытания $T_{исп}$ [°C]; E_p , $E_{подл}$ [МПа] – модули упругости покрытия и углеродной подложки; α_p , $\alpha_{подл}$ [град⁻¹] – коэффициенты линейного термического расширения покрытия и углеродной

подложки; $\delta_{п}$, $\delta_{подл}$ [мм] – толщины защитного покрытия и углеродной подложки.

При $E_{п} \approx E_{подл}$ и малой $\delta_{п} / \delta_{подл} < 1$ σ_T рассчитывается по упрощенной формуле: $\sigma_T \approx E_{п} \Delta T (\alpha_{подл} - \alpha_{п})$.

После испытания определяется масса модельного образца, и ее изменение (расход) во времени в результате уноса при воздействии теплового потока: $\dot{m} = \frac{m_k - m_n}{S \cdot \Delta t}$, где: m_n - начальная масса модельного образца до испытания; m_k - конечная масса модельного образца после испытания.

В работе разработка новой системы теплозащиты для КРПД-Т базировалась на основе предшествующей системы теплозащитных абляционных материалов, применяемых ранее в РДТТ (рис. 30) [7].

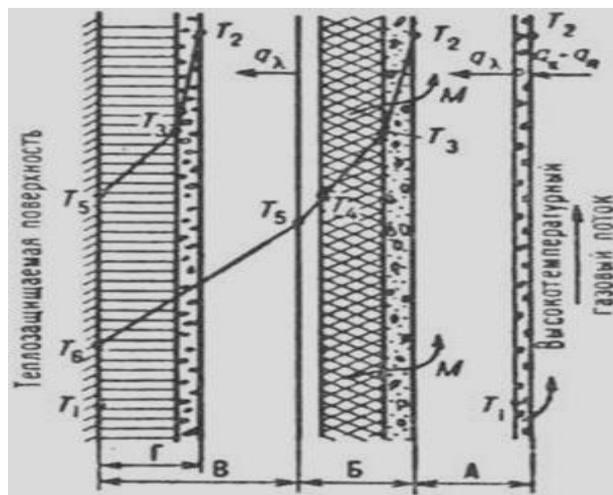


Рис. 30. Схема тепло- и массообмена в предшествующей системе

теплозащитных абляционных материалов, применяемых ранее в РДТТ, где: А - уносимый слой; Б - зона абляции; В - неизменный материал; Г - пример возможного достижения зоной Б теплозащищаемой стенки; q_k - конвективный тепловой поток к поверхности материала, q_R - радиац.

тепловой поток, q_λ - тепловой поток к защищаемой поверхности;
T1-начальная температура; T2 - температура кипения; T3 - температура плавления; T4 - температура начала "коксования";
T5 - температура начала термического разложения;
T6 - температура теплозащищаемой стенки в момент времени, соответствующий указанному положению зоны Б; M - направление движения уносимой массы.

Также при разработке новой системы теплозащиты для конструкций КРПД-Т учитывалась зависимость, описывающая в общей форме унос (абляция) следующим классическим уравнением [7]:

$$q_k + q_R = G_\Sigma \Delta H_{пл} + \varepsilon \sigma T_w^4 + q_{вд} + G_w \Delta H_w + q_\lambda, \text{ где:}$$

G_Σ - суммарный унос массы в результате пиролиза поверхности, выделения газообразных продуктов и стекания расплава; $\Delta H_{пл}$ -энтальпия плавления;
 G_w -унос продуктов пиролиза; ΔH_w - энтальпия физ.-хим. превращений;
 ε -коэф. черноты; σ - постоянная Стефана - Больцмана.

Выводы:

Система теплозащиту теплонапряженных конструкций и деталей КРПД-Т создана с управляемым уносом массы из:

- внутренних и наружных эластичных ТЗП, где внутреннее ТЗП будет изготавливаться из материала марки "Искрин", а наружное ТЗП из материала сублимирующего типа на основе органических (хлорсульфированный полиэтилен, латексы) или кремнийорганических связующих с наполнителем

из пробки или фенольных, стеклянных, углеродных микросфер. В частности, наружное ТЗП планируется применить для решения проблемы снижения температуры нагрева (внешнего теплоподвода), возникающего от встречного аэродинамического потока на режиме Н до 20 км и М до 4, на клеевом шве по внутренней поверхности корпуса КРПД-Т. Крупный недостаток – высокая стоимость изготовления эластичного наружного ТЗП и эксплуатационное ограничение по толщине, рост которой влияет на повышение лобового сопротивления;

- высокотемпературных углеродных КМ, а также наносимых на их поверхность в качестве покрытия или в объеме керамических, керамоподобных компонентов. Данная система защита применялась в деталях регулятора расхода топлива из углерод-углеродных КМ в виде керамических покрытий из карбид кремния методом тройного силицирования (комбинированный метод силицирования), что позволило решить проблему обеспечения эрозионной, теплоэрозионной, теплхимической стойкости УУКМ в потоке продуктов газогенерации.

Библиографический список

1. Сорокин В.А., Копылов А.В., Тихомиров М.А., Стирин Е.А., Логинов А.Н., Федоров Д.Ю., Валуй П.В. Построение системы теплозащиты из углеродных композиционных материалов с покрытиями для

теплонпряженных конструкций двигателей летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63029>

2. Стирин Е.А., Логинов А.Н., Тихомиров М.А. Математическое моделирование и расчет характеристик продуктов сгорания газогенератора комбинированного ракетно-прямоточного двигателя // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49307>

3. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Соотношение тепловой и эрозионной компонент при теплоэрозионном разрушении материалов в сверхзвуковом гетерогенном потоке // Материалы V Минского международного форума по тепло – и массообмену. Минск, 2004. Т. 1. С. 318-319.

4. Михайловский К.В., Тимофеев И.А., Резник С.В. Моделирование процессов химического осаждения и тепломассообмена на макро- и микроуровнях при газофазном методе получения деталей из углерод-керамических композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 1. С. 18-30.

5. Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М. Композиционные материалы: Справочник. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с.

6. Баскаков В.Н., Копылов А.В., Семёнова А.Н. Токоподвод к нагревателю для высокотемпературных электронагревательных установок. Патент № 94102 РФ. Бюлл. № 13, 10.05.2010.

7. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. - М.: Энергия, 1976. – 392 с.