

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ПРОТОЧНЫХ ТРАКТОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А. Товстоног

tovstonog@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В современной технике широко используются газодинамические установки, содержащие проточный тракт высокотемпературного рабочего тела, а их эффективность во многом зависит от предельно достижимой температуры, во многом определяемой термостойкостью конструктивных материалов и системами тепловой защиты наиболее теплонапряженных узлов конструкции. Чаще всего в таких установках применяют массообменные методы теплозащиты с использованием хладоресурса топливных компонент. Однако в некоторых газодинамических установках, таких как прямоточные воздушно-реактивные двигатели больших скоростей, этого оказывается достаточно только для поддержания допустимого уровня температур элементов проточного тракта, а тепловая защита смежных с ним ограждающих элементов конструкции может быть обеспечена неохлаждаемыми экранами или теплоизолирующими облицовками. Дана сравнительная оценка температурного режима и характеристик альтернативных типов теплозащитных экранов

Ключевые слова

Газодинамические установки, высокие температуры, тепловая защита, металлические экраны, высокотемпературные керамики, объемно-отражающие рассеивающие материалы

Поступила 06.11.2019

Принята 25.11.2019

© Авторы, 2020

Введение. Проточный тракт высокотемпературных газодинамических установок содержит области интенсивного тепловыделения, такие как камера сгорания и форсажная камера воздушно-реактивных двигателей, что обуславливает высокотемпературное тепловое воздействие на конструктивные элементы, а следовательно, требует решения вопросов их тепловой защиты. Температура газового потока в проточном тракте современных газотурбинных двигателей (ГТД) составляет 1600...2000 К. Для охлаждения элементов конструкции используются методы струйного или пористо-

го охлаждения с использованием воздуха в качестве хладагента [1–3], расход которого составляет от 10...12 % до 25...30 % общего расхода воздуха через двигатель, а конструктивные элементы двигателя, подверженные воздействию высокотемпературного газового потока, обеспечиваются высокотемпературными антикоррозионными защитными покрытиями [4]. Использование жаропрочных сталей в элементах конструкции проточных трактов высокотемпературных газодинамических установок ограничивается температурами 1300...1400 К, однако и при этих температурах стенки проточный тракт представляет собой источник интенсивного теплового излучения (плотность потока излучения $\sim 20 \cdot 10^4$ Вт/м²), что обуславливает необходимость тепловой защиты элементов ограждающей конструкции (корпуса), для чего используется как конвективное охлаждение потоком воздуха, так и радиационные экраны [5, 6].

В тяговых установках летательных аппаратов больших сверхзвуковых скоростей — прямоточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД), в которых как окислитель используется воздух, а в качестве горючего — высокоэнергетические углеводородные топлива или водород [7], температура в проточном тракте (камере сгорания) составляет $\sim 2500...2800$ К [8, 9], воздух не может служить хладагентом и работоспособность камеры сгорания может быть обеспечена лишь при охлаждении компонентами топлива [9–12] и применении высокотемпературных керамических материалов [4, 9, 13], допускающих нагрев до температур ~ 2000 К и более в окислительной атмосфере. При таких температурах (радиационный тепловой поток $\sim 90 \cdot 10^4$ Вт/м²) тепловая защита элементов ограждающей конструкции может быть обеспечена либо путем использования теплоты фазовых переходов уносимых (испаряющихся или аблирующих) материалов [14–16], либо применением пакетов высокотемпературных экранов [17–19], либо комбинацией этих методов и средств.

Основные соотношения и некоторые результаты, характеризующие эффективность многоэлементного пакета металлических экранов в системе тепловой защиты проточного тракта высокотемпературных газодинамических установок, приведены в работах [18, 19], а также отмечены некоторые недостатки, присущие этому средству тепловой защиты. Во-первых, основное свойство экрана — излучательная способность — существенно зависит от температурно-временного режима нагрева и рабочей среды, т. е. в определенной степени может быть нестабильной характеристикой в высокотемпературной окислительной среде; во-вторых, для наиболее перспективных высокотемпературных материалов экрана, таких как молибден, нио-

бий и других, излучательная способность достаточно высока ($\sim 0,25 \dots 0,3$) и для эффективной тепловой защиты конструкции необходимо использование многослойных экранов, что представляет определенные трудности их конструктивного исполнения в протяженных конструкциях проточных трактов. В связи с этим представляет интерес использование экранов из слабопоглощающих излучение полупрозрачных высокотемпературных керамических материалов, имеющих высокий коэффициент отражения за счет эффекта объемного рассеивания, а также сравнительная оценка их характеристик по отношению к пакету металлических экранов, что составляет цель настоящей работы.

Оксидные керамики как материалы радиационных экранов. Основное свойство керамических радиационных экранов — это высокая отражательная способность, обусловленная явлением рассеяния на неоднородностях макроструктуры, присущая проявляющим свойство полупрозрачности оксидным соединениям, таким как оксид алюминия, оксид иттрия, оксид циркония и др.

При практических расчетах теплового состояния конструктивных элементов проточного тракта высокотемпературных установок в качестве исходных данных задают условия теплового нагружения, теплофизические и интегральные оптические характеристики материала экранов — отражательную и излучательную способности в поле действующего излучения. При оценке работоспособности в конкретных условиях теплового и силового воздействий и предельно-допустимых режимов эксплуатации задают физико-механические характеристики, такие как температуры фазовых переходов (рекристаллизации, плавления), модуль упругости, коэффициент термического расширения, допустимые напряжения или деформации.

Поскольку тепловое состояние (температура) экранов во многом определяется их оптико-физическими свойствами, то предварительно оценим этот параметр при вариации излучательной способности, используя ранее рассмотренную модель проточного тракта как системы огневой стенки, промежуточного экрана и обшивки (рис. 1) [18]. В качестве исходных данных примем следующие значения параметров теплового нагружения, соответствующие течению продуктов сгорания стехиометрической смеси керосин/воздух при давлении $p_0 = 4$ атм в канале с эквивалентным диаметром $d = 0,1$ м; температура и скорость потока $T_0 = 2600$ К, $v_0 = 700$ м/с; излучательная способность обеих поверхностей огневой стенки $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} = 0,85$; излучательная способность внешней поверхности обшивки

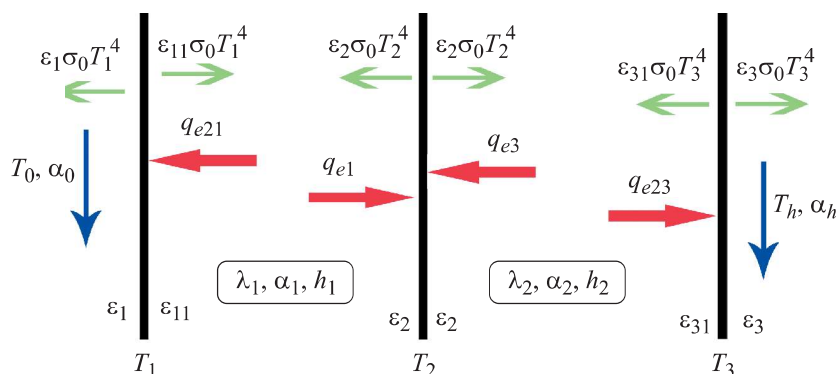


Рис. 1. Модель проточного тракта

$\epsilon_3 = 0,9$; температура внешней среды $T_h = 300$ К; коэффициент теплоотдачи $\alpha_h = 20$ Вт / (м² · К).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости температур элементов системы для двух значений излучательной способности внутренней поверхности обшивки при вариации излучательной способности эквивалентного экрана. Как следует из приведенных зависимостей, температура экрана возрастает с увеличением его поглощательной способности. Однако при $\epsilon_2 \leq 0,2 \dots 0,25$ температура $T_2 \leq 1900$ К (~ 1600 °С), т. е. находится в области допустимых значений для термостойких конструкционных оксидных керамик [20] (выполненных на основе оксидов циркония ZrO_2 , магния MgO , алюминия Al_2O_3 , иттрия Y_2O_3 и их композиций), проявля-

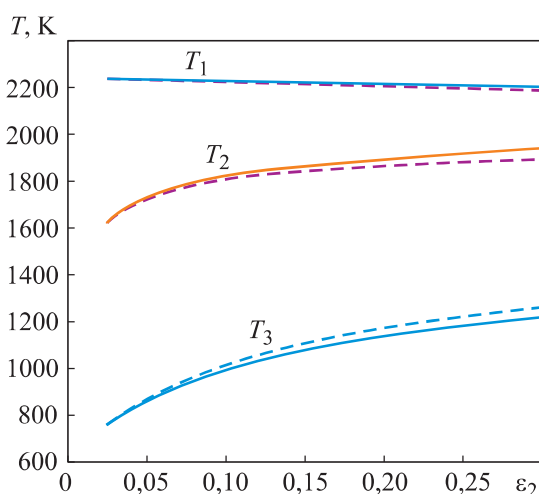


Рис. 2. Зависимость температуры конструктивных элементов от излучательной способности экрана:
сплошные линии — $\epsilon_{31} = 0,3$; штриховая — $\epsilon_{31} = 0,5$

ющих свойство полупрозрачности и высокую отражательную способность за счет эффекта объемного рассеяния при модификации макроструктуры этих материалов [21, 22].

Как следует из приведенных данных, все указанные материалы удовлетворяют применению в качестве материалов для экрана по температуре плавления, выбор же наиболее подходящего материала может лимитироваться рядом других параметров и возможностями технологии изготовления. Характерной особенностью керамики на основе оксида магния является высокая летучесть при высоких температурах — испарение оксида магния начинается при $T \sim 1870 \dots 1920$ К. К негативным свойствам оксида магния следует отнести и более высокий по сравнению с другими материалами коэффициент термического расширения (КТР), достигающий $16 \cdot 10^{-6} 1/\text{К}$ при температуре ~ 2100 К, что обуславливает большие термические напряжения в нестационарных условиях нагрева и при работе в контакте с сопряженными элементами конструкции.

Керамика на основе диоксида циркония — наиболее термостойкая из указанных, широко применяется в высокотемпературных установках при температурах до 2700 К [23], однако при нагреве диоксид циркония претерпевает ряд полиморфных превращений с существенным изменением плотности. Так, при температурах до ~ 1450 К оксид циркония имеет моноклинную α -модификацию плотностью 5850 кг/м^3 , при нагреве переходящую в тетрагональную β -модификацию плотностью 6160 кг/м^3 , сохраняющуюся до ~ 2650 К и при дальнейшем нагреве переходящую в кубическую γ -модификацию. Фазовые переходы оксида циркония — это процесс кинетический с характерным временем ~ 10 мин [23], что необходимо принимать во внимание при анализе нестационарных режимов нагрева (охлаждения), поскольку при этих полиморфных переходах изменяется не только плотность, но и весь комплекс физико-механических характеристик. Так, КТР моноклинной фазы составляет $7 \cdot 10^{-6} 1/\text{К}$, а тетрагональной $1,28 \cdot 10^{-5} 1/\text{К}$, что может существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние и вызвать разрушение нагреваемой детали конструкции. Следует отметить, что негативное влияние этого фактора компенсируется модификацией материала путем введения 6...15 % стабилизирующих добавок, таких как оксиды магния, кальция, иттрия и др.

Отличительной особенностью оксида циркония является существенно низкая по отношению к другим термостойким оксидам теплопроводность (например, в 2–3 раза ниже, чем у Al_2O_3), что позволяет рассматри-

вать материалы на основе оксида циркония как эффективные высокотемпературные теплоизоляторы. Так, для беспористой оксидной циркониевой керамики плотностью $\sim 5800 \text{ кг/м}^3$ при температуре $T = 1500 \text{ К}$ теплопроводность $\Lambda \sim 1,91 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$, при плотности $2200 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$ (пористость $\sim 0,6$) $\Lambda \sim 0,866 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$, а при плотности $1200 \dots 1500 \text{ кг/м}^3$ (пористость $\sim 0,75$) $\Lambda \sim 0,471 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ [24].

Термостойкость оксида алюминия значительно ниже, чем оксида циркония и для наиболее чистой модификации — корунда составляет $\sim 2300 \text{ К}$; теплопроводность беспористого корунда при плотности 3900 кг/м^3 равна $25 \dots 30 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$, а при плотности 350 кг/м^3 — $0,7 \dots 0,9 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$.

Следует отметить, что пористость материала определяет не только теплопроводность, но и рассеивающие свойства для полупрозрачных материалов, в связи с чем этот параметр может рассматриваться как основной при проектировании радиационных экранов.

Терморadiационные характеристики экранов из объемно-рассеивающих пористых материалов — коэффициенты отражения и излучения, определяются большим числом факторов (спектральными свойствами матрицы (массива материала), пористостью, формой и распределением пор по размерам, чистотой материала), конкретные значения этих факторов могут быть определены лишь экспериментально, а в тепловых расчетах использованы лишь оценочные числовые значения.

Поскольку частичная прозрачность материала проявляется в определенной полосе длин волн, то отражение и пропускание излучения элементом конструкции следует рассматривать отдельно для областей прозрачности и непрозрачности. Кроме того, и собственное излучение материала также имеет две составляющие — излучение поверхности, определяемое температурой поверхности, и излучение объема полупрозрачного материала, определяемое полем температур.

Таким образом, для частично прозрачного материала следует вводить два набора терморadiационных характеристик — для областей непрозрачности (в дальнейшем эти величины будут отмечаться индексом «*b*») и прозрачности (отмечаются индексом «*t*»).

Пусть плотность потока излучения внешнего источника имеет спектральное распределение $q_{0\lambda}$, а области непрозрачности и частичной прозрачности материала в шкале длин волн характеризуются соответственно полосами $(\Delta\lambda)^b$ и $(\Delta\lambda)^t$. Тогда интегральная плотность потока падающего излучения

$$q_0 = \int_{(\Delta\lambda)^b} q_{0\lambda} d\lambda + \int_{(\Delta\lambda)^t} q_{0\lambda} d\lambda = q_0^b + q_0^t = q_0 \eta^b + q_0 \eta^t, \quad (1)$$

где η^b и η^t — доли потока падающего излучения в области непрозрачности и прозрачности ($\eta^b + \eta^t = 1$).

Терморрадиационные характеристики для области непрозрачности $(\Delta\lambda)^b$ определим следующими соотношениями:

- коэффициент отражения (отражательная способность)

$$\mathcal{R}^b = \frac{\int_{(\Delta\lambda)^b} \mathcal{R}_\lambda^b q_{0\lambda} d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda)^b} q_{0\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\eta^b q_0} \int_{(\Delta\lambda)^b} \mathcal{R}_\lambda^b q_{0\lambda} d\lambda; \quad (2)$$

- коэффициент излучения (излучательная способность)

$$\mathcal{E}^b = \frac{\int_{(\Delta\lambda)^b} q_{w,\lambda}^{b*} d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda)^b} B_0(\lambda, T_w) d\lambda} = \frac{1}{\sigma_B T_w^4 \eta^b} \int_{(\Delta\lambda)^b} \mathcal{E}_\lambda^b B_0(\lambda, T_w) d\lambda, \quad (3)$$

где $q_{w,\lambda}^{b*}$ — спектральная плотность потока собственного излучения поверхности; $B_0(\lambda, T_w)$ — плотность потока равновесного излучения (функция Планка) при температуре поверхности T_w ; $\sigma_B = 5,668 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана.

Аналогично для области прозрачности $(\Delta\lambda)^t$:

- коэффициент отражения (отражательная способность)

$$\mathcal{R}^t = \frac{\int_{(\Delta\lambda)^t} \mathcal{R}_\lambda^t q_{0\lambda} d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda)^t} q_{0\lambda} d\lambda} = \frac{1}{\eta^t q_0} \int_{(\Delta\lambda)^t} \mathcal{R}_\lambda^t q_{0\lambda} d\lambda; \quad (4)$$

- коэффициент излучения (излучательная способность)

$$\mathcal{E}^t = \frac{\int_{(\Delta\lambda)^t} q_{w,\lambda}^{t*} d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda)^t} B_0(\lambda, T_w) d\lambda} = \frac{1}{\sigma_B T_w^4 \eta^t} \int_{(\Delta\lambda)^t} \mathcal{E}_\lambda^t B_0(\lambda, T_w) d\lambda, \quad (5)$$

где $q_{w,\lambda}^{t*}$ — спектральная плотность потока собственного излучения, выходящего из объема материала во внешнее пространство. Эта величина определяется полем температур в объеме, зависящем от поля излучения, т. е. в общем случае задача является сопряженной, а излучательную способность следует рассматривать только как некоторую эффективную величину, характеризующую излучательные свойства элемента конструкции при решении задач радиационного теплообмена в системе тел.

Интенсивность и поток излучения, входящие в выражения для терморadiационных характеристик элементов конструкции из полупрозрачных материалов, находятся из решения уравнения переноса излучения при задании спектральных моделей среды и потока излучения внешних источников. Для наиболее часто используемой при решении практических задач модели селективно-серой среды, оно может быть записано в виде

$$\frac{dI_{\Delta\lambda}(\bar{l})}{dl} = -(\alpha_{\lambda} + \sigma_{\lambda})I_{\Delta\lambda}(\bar{l}) + \alpha_{\lambda}n_{\lambda}^2 \frac{B_{0\Delta\lambda}(T)}{\pi} + \frac{\sigma_{\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} \rho_{\lambda}(\bar{l}; \bar{l}') I_{\Delta\lambda}(\bar{l}') d\omega', \quad (6)$$

где $I_{\Delta\lambda}(\bar{l}) = \int_{\Delta\lambda} I_{\lambda}(\bar{l}) d\lambda$ — интенсивность излучения (яркость) по направлению \bar{l} в среде в выделенной полосе длин волн $\Delta\lambda$ области полупрозрачности; $B_{0\Delta\lambda}(T) = \int_{\Delta\lambda} B_0(\lambda; T) d\lambda$ — интенсивность собственного излучения среды (интеграл от функции Планка $B_{0\lambda}(T)$ (светимость)); n_{λ} — действительная часть показателя преломления, а спектральные оптические свойства материала полагаются постоянными в пределах выделенной полосы длин волн $\Delta\lambda$ и заданы феноменологическими коэффициентами (параметрами элементарного объема) — рассеяния σ_{λ} , поглощения α_{λ} и индикатрисой рассеяния $\rho_{\lambda}(\beta)$. Эти величины взаимосвязаны как с первичными спектральными свойствами материала (комплексным показателем преломления), так и его макроструктурой, в первую очередь пористостью, формой и масштабом пор, определяющих рассеяние излучения.

Плотность потока излучения в среде определяется соотношением

$$q(\bar{l}_i) = \int_{4\pi} I(\bar{l})(\bar{l} \cdot \bar{l}_i) d\omega,$$

где \bar{l}_i — ось координат; ω — телесный угол.

Таким образом, задавая или экспериментально определяя спектральные оптико-физические свойства материала, можно рассчитать интегральные терморadiационные характеристики, радиационный теплообмен в системе тел и температурное состояние элементов конструкции.

Особенности характеристик излучения рассеивающих материалов.

Рассеяние излучения в полупрозрачных материалах обусловлено оптическими неоднородностями среды, имеющими различную природу, однако общей причиной является различие показателей преломления массива материала (дисперсионной среды) и инородных частиц или пустот (дисперсных частиц). Роль рассеяния сводится к уменьшению анизотропии поля излучения и, таким образом, к снижению градиента плотности потока излучения и его абсолютной величины в среде. Это, в свою очередь, приводит к изменению терморadiационных характеристик материала в непосредственной связи с оптико-физическими свойствами — коэффициентами поглощения и рассеяния.

Для иллюстрации значимости фактора рассеяния на рис. 3 приведены результаты расчетов терморadiационных характеристик модельной изотермической среды с коэффициентом поглощения $\varkappa = 0,137 \text{ мм}^{-1}$ (по литературным данным соответствует среднеинтегральному по спектру прозрачности коэффициенту поглощения корунда) при вариации коэффициента удельного рассеяния $\gamma = \sigma / \varkappa$ на основе решений уравнения переноса излучения (6) по соотношениям, приведенным в [25, 26]. Видно, что с увеличением толщины слоя возрастают отражательная и излучательная способности и падает пропускательная \mathcal{T} способность, причем с ростом толщины слоя отражательная и излучательная способности достигают некоторого предела ($\mathcal{R}_\infty; \mathcal{E}_\infty$), соответствующего оптически полубесконечному слою. Физическая толщина такого слоя ($\mathcal{R}_\infty - \mathcal{R}(h_\infty) = 10^{-3}$) может быть определена как [26]:

$$h_\infty \approx \frac{2,3}{\alpha \varkappa}, \quad (7)$$

где $\alpha = \sqrt{3(1 + \gamma_{ef})}$, $\gamma_{ef} = \gamma \left(1 - \int_0^\pi \rho(\beta) \sin \beta \cos \beta d\beta \right)$.

Формула (7) позволяет обоснованно выбирать толщину экрана h_∞ из рассеивающего материала, обеспечивающую близкие к максимальным отражательную и излучательную способности экрана (рис. 4, а) при его известных оптических характеристиках.

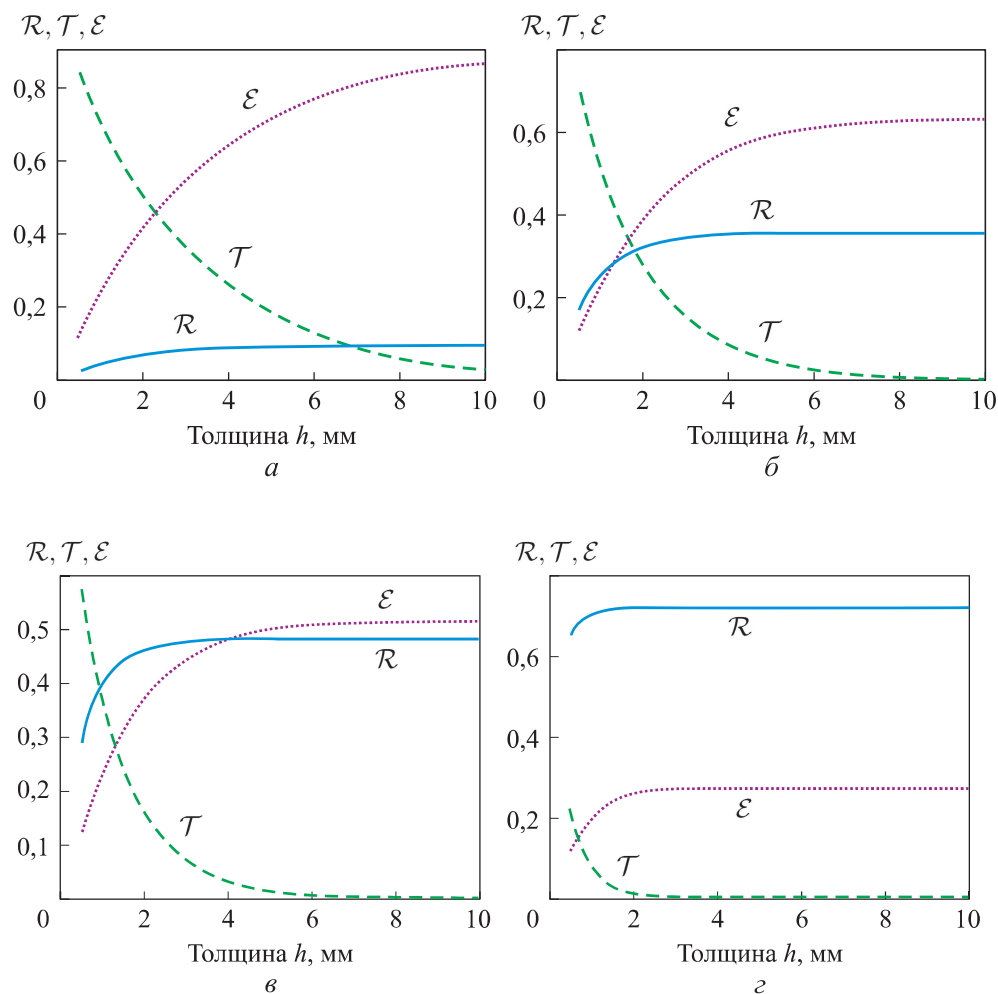


Рис. 3. Зависимость терморadiационных характеристик от толщины слоя для различных значений параметра рассеяния γ :

$$\gamma = 1 \text{ (a)}, \quad \gamma = 5 \text{ (б)}, \quad \gamma = 10 \text{ (в)}, \quad \gamma = 50 \text{ (г)}$$

Усиление рассеивающих свойств (параметра γ) приводит к уменьшению толщины оптически полубесконечного слоя и снижению излучательной способности (рис. 4, б). При этом вариацией оптических свойств за счет изменения структуры материала можно обеспечить приемлемые для практических приложений характеристики отражательного экрана высокотемпературного проточного тракта газодинамических установок.

В настоящее время, несмотря на достаточно широкое распространение теплоизоляционных материалов на основе оксидных соединений, данные об их терморadiационных характеристиках в области высоких температур весьма ограничены, а зачастую и противоречивы, что является следствием

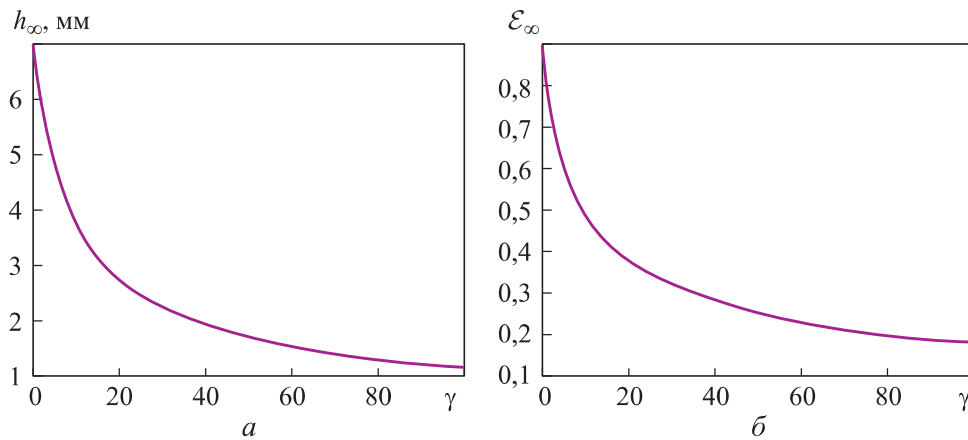


Рис. 4. Зависимость толщины (*a*) и излучательной способности (*б*) полубесконечного слоя от параметра рассеяния γ ; коэффициент поглощения $\alpha = 0,137 \text{ мм}^{-1}$

сложности экспериментальных исследований и влиянием на них большого числа структурных и технологических факторов. Но поскольку отражательные свойства, обусловленные объемным рассеянием материала, проявляются в спектральной области прозрачности, то это в первую очередь и определяет выбор материала радиационного экрана.

Наиболее полная информация получена для силикатных материалов, послуживших основой для создания систем тепловой защиты орбитальных самолетов «Шаттл» и «Буран» [22, 27], а также для использования таких материалов в высокотемпературных установках [28]. Высокими отражательными свойствами при малых плотности и теплопроводности обладают пористые материалы на основе оксида кремния. Так, например, волокнистый материал ТЗМК-10 при плотности 144 кг/м^3 (пористость 0,935) в спектральной области до $\sim 4 \text{ мкм}$ при нормальной температуре имеет отражательную способность $\sim 0,9$ ($\gamma_{ef} \approx 500$), интегральную излучательную способность при температуре 1500 К $\sim 0,2$ [29] и коэффициент теплопроводности $\Lambda \sim 0,05 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$. Однако температурный диапазон применения подобных материалов ограничен $T \sim 1500 \text{ К}$.

Керамика на основе микробаллонов оксида алюминия проявляет свойство полупрозрачности в области спектра до $\lambda \sim 6 \text{ мкм}$ и при нормальной температуре на длинах волн $0,63$; $1,15$ и $3,39 \text{ мкм}$ имеет высокую отражательную способность [22].

Керамика на основе оксида циркония, стабилизированная оксидом иттрия, проявляет свойство высокой прозрачности в области спектра до

~ 10 мкм и при нормальной температуре по результатам измерений [30, 31] на длинах волн 0,488, 0,633, 1,15 и 3,39 мкм имеет отражательную способность 0,79, 0,88, 0,91 и 0,68 (соответственно $\gamma_{ef} \approx 100, 300, 600$ и 40) для материала пористостью 18...20 %, а для керамики, стабилизированной оксидом кальция, значения отражательной способности на тех же длинах волн составляют 0,4, 0,66, 0,77 и 0,70 ($\gamma_{ef} \approx 10, 30, 80$ и 40). Особо следует отметить, что для указанных материалов условие предельно высокого отражения имеет место для образцов толщиной 4...10 мм.

На рис. 5 приведены рассчитанные зависимости доли излучения оксидных материалов, наиболее перспективных к применению в системах тепловой защиты высокотемпературных проточных трактов.

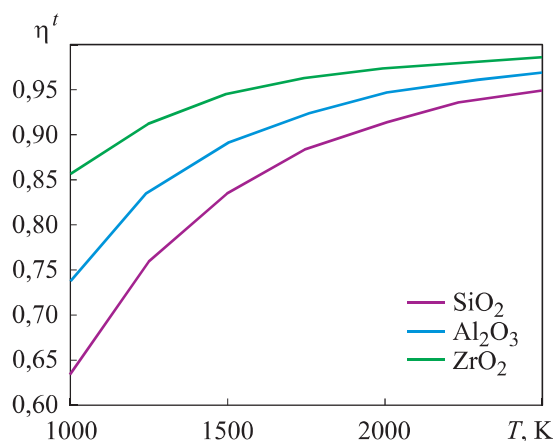


Рис. 5. Зависимости доли излучения в области прозрачности оксидов кремния, алюминия (корунда) и циркония от температуры источника

Как видно, доля излучения в области прозрачности корунда и оксида циркония при эффективных температурах внешнего источника излучения $T \geq 1500 K$, характерных для проточных трактов, составляет 0,9...0,98, а имея в виду возможность высокой отражательной способности при соответствующих соотношениях коэффициентов рассеяния σ и поглощения α , характеризуемом параметром рассеяния $\gamma = \sigma / \alpha$, экраны из таких материалов, предположительно, должны иметь малую излучательную способность. Однако в связи с влиянием большого числа факторов на оптико-физические свойства полупрозрачных материалов и ограниченности экспериментальной информации можно дать лишь ориентировочные оценки терморadiационных характеристик.

Так, согласно данным, приведенным в работе [22], излучательная, а если принять допущение справедливости закона Кирхгофа, и поглощательная

способности высокопористой керамики из оксида алюминия в области спектральной прозрачности при нормальных температурах составляют 0,02...0,05. Полагая, что в области непрозрачности поглощается вся соответствующая доля излучения внешнего источника, поглощательную (излучательную) способность экрана для температуры источника $T \geq 1500$ К можно оценить величиной $\varepsilon \leq 0,2$. Однако увеличение температуры материала экрана приводит к существенному росту коэффициента поглощения [22, 30, 31] и хотя, как указано в этих работах «...рассеяние, обусловленное наличием пор, при этом остается практически неизменным из-за очень слабой температурной зависимости показателя преломления...», отражательная способность материала падает, а излучательная существенно увеличивается. Так, для оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, отражательная способность на длинах волн 0,488, 0,633, 1,15 и 3,39 мкм снижается соответственно до 0,26, 0,49, 0,67 и 0,54 при температуре 1500 К и до $\sim 0,13$ при температуре 2500 К [30], что приводит к росту интегральной излучательной способности до $\varepsilon \approx 0,7$.

Тепловые характеристики экранов. Сложная картина радиационного теплообмена в рассеивающих средах, влияние большого числа факторов на терморadiационные характеристики реальных рассеивающих материалов сложного структурного строения и отсутствие необходимых данных для детального анализа сложного теплообмена в системе тепловой защиты с радиационными экранами из рассеивающих материалов позволяет получить в большей степени лишь качественные оценки возможности их применимости в сравнении с другими теплозащитными системами. Поэтому далее рассматриваются два альтернативных варианта тепловой защиты внешней обшивки проточного тракта от излучения огневой стенки:

- пакет (рис. 6, а) отражающих экранов, разделенных дистанцирующими элементами;
- экран (рис. 6, б) из полупрозрачного объемно-отражающего теплоизолирующего материала.

Для обоих случаев внешние условия приняты одинаковыми — нагрев потоком продуктов сгорания керосин/воздух с коэффициентом избытка воздуха $k_\alpha = 1,5$ при давлении 2 атм; скорость потока в огневом тракте $v_p = 700$ м/с, температура 2500 К.

Для внешней поверхности обшивки задана температура среды $T_h = 300$ К и коэффициент теплоотдачи $\alpha_h = 20$ Вт / (м² · К), что соответствует условиям интенсивной естественной конвекции.

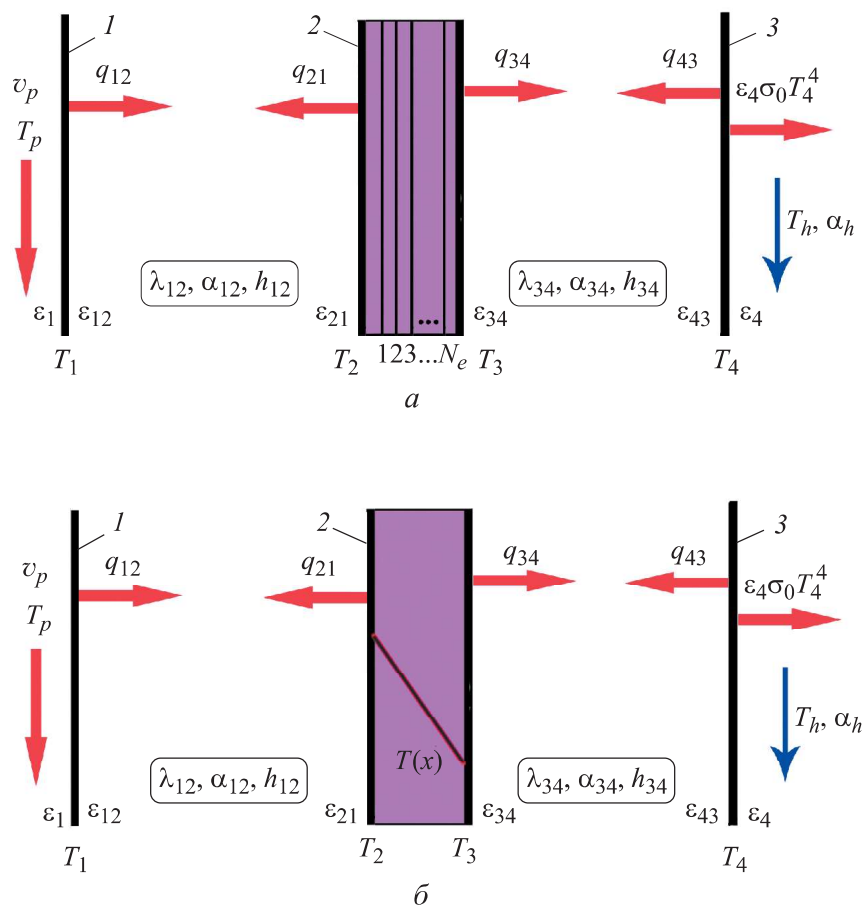


Рис. 6. Схема проточного тракта с многоэлементным пакетом экранов (а) и теплоизолирующим объемно-отражающим экраном (б):

1 — огневая стенка; 2 — экран; 3 — обшивка

Излучательные характеристики элементов для обеих схем приняты следующими:

- излучательная способность обеих поверхностей огневой стенки $\varepsilon_1 = \varepsilon_{12} = 0,9$;
- излучательная способность внешней поверхности обшивки $\varepsilon_4 = 0,9$;
- излучательные способности внешних поверхностей экрана $\varepsilon_{21} = \varepsilon_{34} = 0,3$ и внутренней поверхности обшивки $\varepsilon_{43} = 0,3$, что характерно для тугоплавких материалов, таких как ниобий, тантал, молибден;
- излучательная способность поверхностей внутренних экранов пакета принята $\varepsilon_i = 0,3$.

В зазорах между огневой стенкой, теплозащитным экраном и обшивкой допускается теплопередача конвекцией и теплопроводностью при

задании соответствующих коэффициентов теплопередачи α_{ij} и теплопроводности λ_{ij} , однако в расчетах им присваивались нулевые значения, так как основная цель — это сравнительная оценка характеристик теплозащитного экрана.

Для пакета экранов основной параметр, характеризующий теплоизолирующие свойства, — это число экранов N_e в пакете. На рис. 7 приведены значения температур огневой стенки, граничных экранов теплозащитного пакета и обшивки для идеального случая отсутствия теплового контакта между промежуточными экранами (рис. 7, а), т. е. когда теплопередача осуществляется только излучением, и при наличии теплопроводных дистанцирующих элементов, в качестве которых принята ниобиевая сетка с диаметром проволоки 1 мм и 10%-ной площадью покрытия экрана (рис. 7, б).

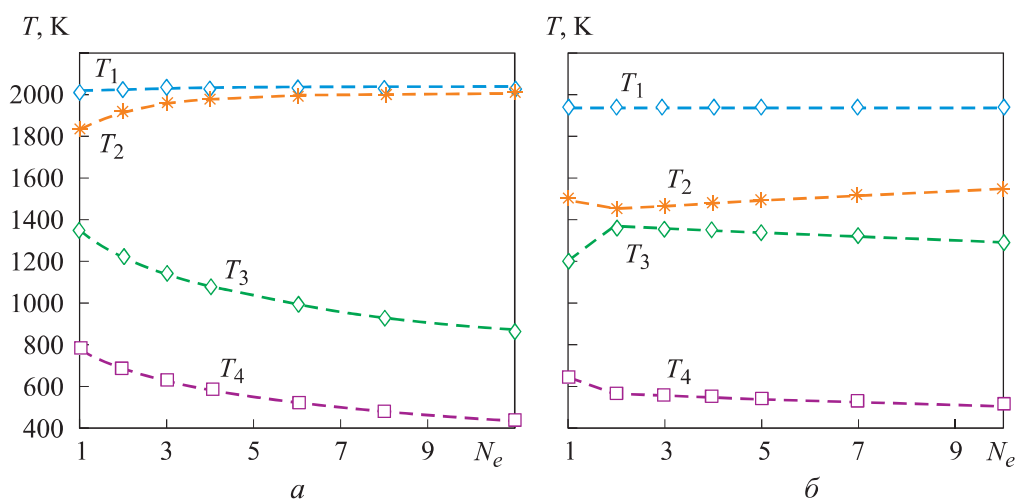


Рис. 7. Зависимость температуры элементов проточного тракта от числа экранов в пакете

Видно, что увеличение числа экранов снижает температуру на границах элементов, изолированных от излучения огневой стенки первым граничным экраном, температура которого, напротив, возрастает и с увеличением числа экранов стремится к температуре огневой стенки, а из рис. 8, где приведены значения температур экранов 10-элементного пакета, следует, что в наиболее жестком температурном состоянии находятся несколько первых, обращенных к огневой стенке экранов пакета, и их термостойкость должна быть на уровне термостойкости огневой стенки.

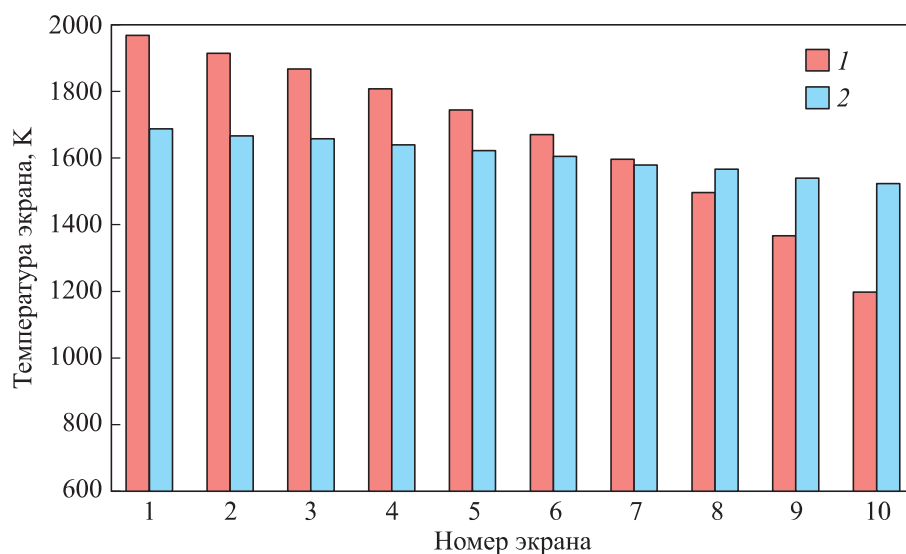


Рис. 8. Температура экранов 10-элементного теплозащитного пакета:

1 — без теплового контакта между экранами; 2 — тепловой контакт через ниобиевые дистанцирующие элементы

Если же обеспечить теплопередачу между промежуточными экранами, то это снижает температуру всех экранов пакета, облегчает их температурный режим и позволяет использовать материалы с меньшей термостойкостью. Эту роль могут выполнять дистанцирующие элементы, разделяющие экраны, например сетки или же рифления (выштамповки) на экранах. Как следует из рис. 7, а и рис. 8, за счет теплопередачи к удаленным экранам снижается температура «горячих» экранов и возрастает «холодных», т. е. распределение температур по элементам пакета становится более однородным (см. рис. 8). При этом, однако, возрастает и температура обшивки.

Таким образом, выбором теплофизических и геометрических характеристик дистанцирующих элементов можно обеспечить оптимальный температурный режим и экрана, и обшивки.

Для экрана из теплоизолирующего материала основной параметр, характеризующий теплоизолирующие свойства, — эффективный коэффициент теплопроводности. При этом, как сказано ранее, если материал является частично прозрачным для излучения, то его отражательная и излучательная способности зависят не только от физических свойств, но от структуры и толщины экрана. Оценка этих факторов может быть выполнена только при детальном анализе процессов теплопереноса в по-

лупрозрачной поглощающей и излучающей среде с учетом спектральных свойств источника излучения (огневой стенки) и материала экрана, что представляет самостоятельную задачу. В проводимом исследовании вопросы термооптики и радиационного теплопереноса не затрагиваются, а полагаются заданными излучательные характеристики ε_{21} , ε_{23} и толщина теплоизолирующего экрана $H = 5$ мм.

На рис. 9, а приведены значения температуры на границах элементов системы в функции эффективной теплопроводности экрана. Видно, что при заданных характеристиках экрана он обеспечивает эффективную защиту обшивки, однако температура «горячей» поверхности экрана остается высокой даже при увеличении коэффициента теплопроводности и при этом нет никаких реальных механизмов для ее снижения, кроме увеличения отражательной способности. Это проиллюстрировано на рис. 9, б, где приведены значения температур для случая практически нереальной отражательной способности $\mathcal{R}_{21} \approx 1 - \varepsilon_{21} = 0,05$ «горячей» поверхности теплоизоляторов в спектре излучателей с температурой $\sim 2000 \dots 2500$ К.

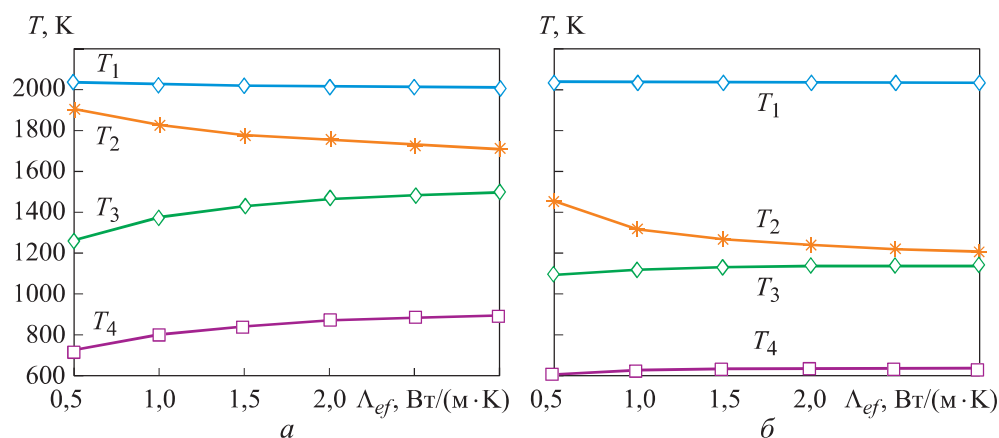


Рис. 9. Зависимость температуры элементов проточного тракта в функции эффективной теплопроводности экрана:

а — $\varepsilon_{21} = \varepsilon_{34} = 0,3$; б — $\varepsilon_{21} = 0,05$; $\varepsilon_{34} = 0,3$

Если же учесть, что значения эффективных излучательных способностей обеих поверхностей слоя полупрозрачного материала при относительно невысоком градиенте температуры близки и в связи с этим положить $\varepsilon_{34} = \varepsilon_{21} = 0,05$, то градиент температуры в слое теплоизоляции уменьшается, а общий уровень температуры возрастает (рис. 10).

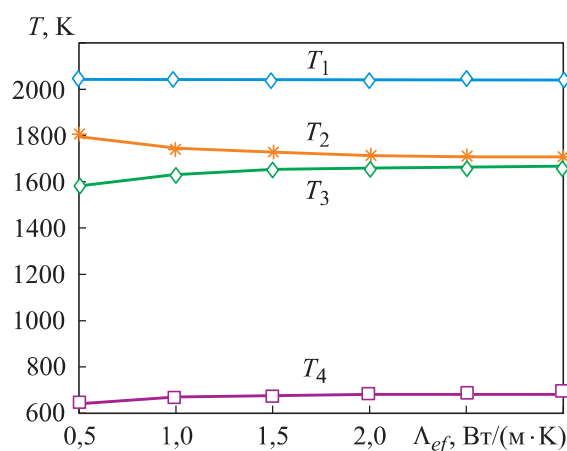


Рис. 10. Зависимость температуры элементов проточного тракта в функции эффективной теплопроводности экрана ($\epsilon_{21} = \epsilon_{34} = 0,05$)

Выводы. Отражательные экраны являются эффективным средством тепловой защиты ограждающей конструкции высокотемпературного газодинамического тракта. Принимая во внимание реальные оптико-физические свойства материалов, потенциально применимых в системе тепловой защиты проточных трактов высокотемпературных газодинамических установок, наиболее широкие возможности в плане реализации оптимального температурного режима имеет многоэлементный пакет термостойких металлических отражающих экранов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М., Машиностроение, 2008.
- [2] Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн. 1–3. М., Машиностроение, 2003, 2005.
- [3] Сударев А.В., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок. Теплообмен. Л., Машиностроение, 1985.
- [4] Михеев С.В., Строганов Г.Б., Ромашин А.Г. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. М., Альтекс, 2002.
- [5] Хронин А.В., ред. Конструкция и проектирование авиационных и газотурбинных двигателей. М., Машиностроение, 1989.
- [6] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь, ОАО «Авиадвигатель», 2006.

- [7] Дегтярь В.Г., Сон Э.Е. Гиперзвуковые летательные аппараты. М., Янус-К, 2018.
- [8] Латыпов А.Ф. Функциональная математическая модель камеры горения водородного гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя. *Прикладная механика и техническая физика*, 2015, т. 56, № 5, с. 76–90.
- [9] Буше М., Фалампен Ф. Камера сгорания для прямоточного воздушно-реактивного двигателя и прямоточный воздушно-реактивный двигатель, содержащий такую камеру сгорания. Патент РФ 2258150. Заявл. 27.02.2003, опубл. 10.08.2005.
- [10] Токталиев П.Д., Мартыненко С.И. Математическая модель системы охлаждения камер сгорания авиационных прямоточных двигателей на эндотермических топливах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2015, № 1, с. 84–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-1-84-98>
- [11] Семенов В.Л., Клеянкин Г.А., Дударева Н.Н. и др. Экспериментальный гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель. Патент РФ 2238420. Заявл. 18.02.2003, опубл. 20.10.2004.
- [12] Семенов В.Л., Галанкин Е.М., Серебряков Д.И. Двигательная установка для гиперзвукового летательного аппарата. Патент РФ 2287076. Заявл. 24.02.2005, опубл. 10.11.2006.
- [13] Кульков А.А., Антипов Е.А., Пашутов А.В. и др. Камера сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя из композиционных материалов. Патент РФ 2643927. Заявл. 06.06.2016, опубл. 06.02.2018.
- [14] Панкратов Б.М. Спускаемые аппараты. М., Машиностроение, 1984.
- [15] Веницкий А.М., ред. Конструкции и обработка РДТТ. М., Машиностроение, 1980.
- [16] Товстоног В.А. Теплообмен в плоском канале с аблирующей стенкой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 4–19. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-4-19>
- [17] Королев В.У., Гонтарь А.С., Коноплев Е.Е. и др. Высокотемпературная экранная теплоизоляция. Патент РФ 2003106471. Заявл. 27.09.2004, опубл. 12.03.2003.
- [18] Товстоног В.А. Радиационный теплообмен и тепловая защита высокотемпературных проточных трактов газодинамических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 6, с. 114–133. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-6-114-133>
- [19] Tovstong V.A. Conjugate heat transfer and estimation of thermal state of elements of the thermal protection shield package. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 4, pp. 44–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-4-44-57>
- [20] Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М., Металлургия, 1976.
- [21] Кудинов В.В., Пузанов А.А., Замбрицкий А.П. Оптика плазменных покрытий. М., Наука, 1981.

- [22] Петров В.А. Модель диффузии излучения для радиационно-кондуктивного теплопереноса в высокотемпературных полупрозрачных рассеивающих теплоизоляционных материалах. М., МИРЭА, 2012.
- [23] Рутман Д.С., Торопов Ю.С., Плинер С.Ю. и др. Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония. М., Metallurgia, 1985.
- [24] Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. М., Metallurgia, 1982.
- [25] Товстоног В.А. Теплофизика рассеивающих материалов: прикладные проблемы и решения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2000, № 3, с. 67–85.
- [26] Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [27] Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. СПб., ЗАО «ТФ «Мир», 2003.
- [28] Падерин Л.Я., Прусов Б.В., Токарев О.Д. Установка для исследований интегральной полусферической излучательной способности теплозащитных материалов и терморегулирующих покрытий. *Ученые записки ЦАГИ*, 2011, т. 42, № 1, с. 53–61.
- [29] Баранов А.Н. Теплопрочностные испытания летательных аппаратов. *Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского*, 1999, вып. 2638.
- [30] Акопов Ф.А., Вальяно Г.Е., Воробьев А.Ю. и др. Терморadiационные характеристики керамики из кубического ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , при высоких температурах. *ТВТ*, 2001, т. 39, № 2, с. 263–273.
- [31] Петров В.А., Чернышев А.П. Терморadiационные характеристики оксида циркония при его нагреве лазерным излучением вплоть до температур интенсивного испарения. *ТВТ*, 1999, т. 37, № 1, с. 62–70.

Товстоног Валерий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Товстоног В.А. Сравнительная оценка теплозащитных характеристик металлических и керамических экранов проточных трактов высокотемпературных газодинамических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 2, с. 52–75. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-2-52-75>

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THERMAL PROTECTIVE CHARACTERISTICS OF METAL AND CERAMIC SHIELDS OF FLOW PATHS OF HIGH-TEMPERATURE GAS DYNAMIC FACILITIES

V.A. Tovstonog

tovstonog@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In modern technology, gas dynamic facilities with a flow path of a high-temperature working fluid are widely used. Their effectiveness largely depends on the maximum achievable temperature, which is to a great extent determined by the heat resistance of structural materials and thermal protection systems of the most heat-stressed structural units. Most often, mass transfer thermal protection methods using the coolant of fuel components are used in such plants. However, in some gas dynamic facilities, such as high-speed ramjet engines, the use of such methods is only sufficient to maintain an acceptable temperature level for the elements of the flow path itself. As for the thermal protection of the enclosing structural elements which are adjacent to the path, it can be provided with either uncooled screens or heat-insulating linings. The study gives a comparative assessment of the temperature regime and characteristics of alternative types of heat shields

Keywords

Gas dynamic facilities, high temperatures, thermal protection, metal shields, high-temperature ceramics, volume-reflecting scattering materials

Received 06.11.2019

Accepted 25.11.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. T. 2. Kompresory. Kamery sgoraniya. Forsazhnye kamery. Turbiny. Vykhodnye ustroystva [Fundamentals of aviation engine and power plants engineering. Vol. 2. Compressors. Burner cans. Afterburners. Output units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008.
- [2] Kulagin V.V. Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. Kn. 1–3 [Theory, calculation and engineering of aviation engines and power plants. Vol. 1–3]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 2005.
- [3] Sudarev A.V., Antonovskiy V.I. Kamery sgoraniya razoturbinnnykh ustanovok. Teploobmen [Burner cans of gas turbine plants. Heat exchange]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985.

- [4] Mikheev S.V., Stroganov G.B., Romashin A.G. Keramicheskie i kompozitsionnye materialy v aviatsionnoy tekhnike [Ceramic and composite materials in aviation technique]. Moscow, Al'teks Publ., 2002.
- [5] Khronin A.V., ed. Konstruktsiya i proektirovanie aviatsionnykh i gazoturbinnnykh dvigateley [Construction and engineering of aviation and gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989.
- [6] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinnnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm', JSC Aviadvigatel' Publ., 2006.
- [7] Degtyar' V.G., Son E.E. Giperzvukovyye letatel'nye apparaty [Hypersonic aircraft]. Moscow, Yanus-K Publ., 2018.
- [8] Latypov A.F. Functional mathematical model of a hydrogen-driven combustion chamber for a scramjet. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, vol. 56, no. 5, pp. 799–812. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894415050065>
- [9] Bushe M., Falampen F. Kamera sgoraniya dlya pryamotochnogo vozdušno-reaktivnogo dvigatelya i pryamotochnyy vozdušno-reaktivnyy dvigatel', sodержashchiy takuyu kameru sgoraniya [Burner can for ramjet engine and ramjet engine with such burner can]. Patent RF 2258150. Appl. 27.02.2003, publ. 10.08.2005 (in Russ.).
- [10] Toktaliev P.D., Martynenko S.I. Mathematical model of the cooling system of combustion chambers of aviation ramjet engines using endothermic fuels. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sc.], 2015, no. 1, pp. 84–98 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-1-84-98>
- [11] Semenov V.L., Kleyankin G.A., Dudareva N.N., et al. Eksperimental'nyy giperzvukovoy pryamotochnyy vozdušno-reaktivnyy dvigatel' [Experimental hypersonic ramjet engine]. Patent RF 2238420. Appl. 18.02.2003, publ. 20.10.2004 (in Russ.).
- [12] Semenov V.L., Galankin E.M., Serebryakov D.I. Dvigatel'naya ustanovka dlya giperzvukovogo letatel'nogo apparata [Power plant for hypersonic aircraft]. Patent RF 2287076. Appl. 24.02.2005, publ. 10.11.2006 (in Russ.).
- [13] Kul'kov A.A., Antipov E.A., Pashutov A.V., et al. Kamera sgoraniya pryamotochnogo vozdušno-reaktivnogo dvigatelya iz kompozitsionnykh materialov [Burner can of ramjet engine of composite materials]. Patent RF 2643927. Appl. 06.06.2016, publ. 06.02.2018 (in Russ.).
- [14] Pankratov B.M. Spuskaemye apparaty [Re-Entry vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984.
- [15] Vinitskiy A.M., ed. Konstruktsii i otrabotka RDTT [Construction and processing of solid fuel rocket engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.
- [16] Tovstonog V.A. Heat transfer in a flattened pipe with an ablative wall. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 6, pp. 4–19 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-4-19>

- [17] Korolev V.U., Gontar' A.S., Konoplev E.E., et al. Vysokotemperaturnaya ekrannaya teploizolyatsiya [High temperature shield isolation]. Patent RF 2003106471. Appl. 27.09.2004, publ. 12.03.2003 (in Russ.).
- [18] Tovstonog V.A. Radiation heat transfer and thermal protection of air-gas channel of gas dynamic plant. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2017, no. 6, pp. 114–133 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2017-6-114-133>
- [19] Tovstong V.A. Conjugate heat transfer and estimation of thermal state of elements of the thermal protection shield package. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 4, pp. 44–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-4-44-57>
- [20] Samsonov G.V., Vinititskiy I.M. Tugoplavkie soedineniya [High-melting compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976.
- [21] Kudinov V.V., Puzanov A.A., Zambrzhitskiy A.P. Optika plazmennyykh pokrytyy [Optics of plasma coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1981.
- [22] Petrov V.A. Model' diffuzii izlucheniya dlya radiatsionno-konduktivnogo teploperenosa v vysokotemperaturnyykh poluproзрачных rasseivayushchikh teploizolyatsionnykh materialakh [Model of radiation diffusion for heat transfer by radiation and conduction in high-temperature translucent scattering heat insulators]. Moscow, MIREA Publ., 2012.
- [23] Rutman D.S., Toropov Yu.S., Pliner S.Yu., et al. Vysokoogneupornye materialy iz dioksida tsirkoniya [High refractory materials of zirconium dioxide]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985.
- [24] Litovskiy E.Ya., Puchkelevich N.A. Teplofizicheskie svoystva ogneuporov [Thermal-physical properties of refractories]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982.
- [25] Tovstonog V.A. Thermal physics of scattering materials: applied problems and solutions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2000, no. 3, pp. 67–85 (in Russ.).
- [26] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktsiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve [Heat transfer and thermal tests on aerospace materials and constructions at radiative heating]. Moscow, BMSTU Publ., 2014.
- [27] Gofin M.Ya. Zharostoykie i teplozashchitnye konstruktsii mnogorazovykh aerokosmicheskikh apparatov [Heat-resistant and heat protective constructions of reusable aerospace vehicles]. St. Petersburg, ZAO "TF "Mir" Publ., 2003.
- [28] Paderin L.Ya., Prusov B.V., Tokarev O.D. Facility for investigations of total hemispherical emissivity of heat protection materials and thermal control coatings. *TsAGI Sc. J.*, 2011, vol. 42, no. 1, pp. 71–82. DOI: <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.v42.i1.50>
- [29] Baranov A.N. Teploprochnostnye ispytaniya letatel'nykh apparatov [Heat strength tests of aircraft]. *Trudy TsAGI im. prof. N.E. Zhukovskogo*, 1999, vyp. 2638 (in Russ.).

[30] Akopov F.A., Val'yano G.E., Vorob'yev A.Yu., et al. Thermal radiative properties of ceramic of cubic ZrO_2 stabilized with Y_2O_3 at high temperatures. *High Temp.*, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 244–254. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1017574816705>

[31] Petrov V.A., Chernyshev A.P. Thermal-radiation properties of zirconia when heated by laser radiation up to the temperature of high-rate vaporization. *TVT*, 1999, vol. 37, no. 1, pp. 62–70 (in Russ.).

Tovstonog V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Tovstonog V.A. Comparative assessment of thermal protective characteristics of metal and ceramic shields of flow paths of high-temperature gas dynamic facilities. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 2, pp. 52–75 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-2-52-75>