

УДК 641.454.2

Исследование теплового состояния резонатора газодинамической системы инициирования процесса разложения унитарного топлива*

О.А. Ворожеева¹, К.Ю. Арефьев²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.² ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2.

Study of the thermal state of a resonator in a gas-dynamic system initiating monopropellant decomposition

O.A. Vorozheeva¹, K.Yu. Arefyev²¹ Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.² Central Institute of Aviation Motors n. a. P.I. Baranov, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation.

e-mail: arefyev@rambler.ru, oa-vorozheeva@mail.ru



Развитие малогабаритных генераторов высокоэнтальпийного потока (МГВП) связано с использованием энергоемких экологически чистых унитарных топлив, в том числе оксида азота (N_2O). Перспективным направлением является применение резонансных газодинамических систем (РГС) для инициирования процесса разложения N_2O в МГВП. Выполнено математическое моделирование теплового состояния стенок резонансной полости РГС, что является актуальным ввиду высокой теплонагруженности данного элемента конструкции. Представлены результаты тестовых расчетов распределения температуры в стенке резонаторной полости при разложении N_2O . Получены значения предельного времени работы РГС для непрерывного и импульсного режимов. Выполнены расчетные исследования ресурсных характеристик для различных жаростойких материалов и теплозащитных покрытий, нанесенных на стенку резонаторной полости. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. По результатам исследования выработаны рекомендации по использованию газодинамической системы инициирования рабочего процесса и предложены методы увеличения ее ресурсных характеристик применительно к энергосиловым установкам различного назначения, использующих в качестве унитарного топлива N_2O .



Ключевые слова: газодинамическая система, тепловое состояние, унитарное топливо, математическое моделирование.

The development of small high-enthalpy plasma generators (SHEPG) is dictated by the use of ecological high-energy monopropellants including nitrous oxide (N_2O). Gas-dynamic resonance systems (GRS) have great potential in initiating the decomposition of N_2O in SHEPGs. This paper deals with the mathematical modeling of the thermal state of GRS resonant cavity walls, which is very important because of high heat loads acting on these structural elements. The results of test calculations of temperature distribution in resonant cavity walls are presented for the case of N_2O decomposition. The critical times of continuous and pulsed GRS operation are determined. The GRS endurance is analyzed taking into account various heat-resistant materials and protective coatings deposited on resonant cavity walls. The results of the numerical analysis are compared with experimental studies. The potential use of a gas-dynamic initiation system

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта №14-08-01118.

is discussed, and the methods of increasing its endurance as applied to various power plants using N_2O as a monopropellant are proposed.

Keywords: gas-dynamic system, thermal state, monopropellant, mathematical modeling.

В настоящее время особую актуальность приобретают работы в области создания малогабаритных генераторов высокоэнтальпийного потока (МГВП) [1] на экологически чистых унитарных топливах (УТ). К МГВП могут быть отнесены энергосиловые и двигательные установки малогабаритных летательных аппаратов [2, 3], технологические устройства газопламенного напыления покрытий и абразивной резки материалов [4], а также стендовые газогенераторы [5].

В основе принципа действия однокомпонентных МГВП заложен процесс разложения УТ. В качестве перспективного УТ может использоваться оксид диазота (N_2O). К преимуществам N_2O , представляющим наибольший интерес для МГВП, относятся следующие [3]:

- выделение тепловой энергии при разложении (82 кДж/моль);
- упрощение системы подачи за счет эффекта самовытеснения собственными насыщенными парами с давлением более 4 МПа;
- экологическая безопасность (относится к 4-му классу малоопасных веществ).

Одним из направлений улучшения характеристик МГВП является создание эффективной и надежной системы инициирования разложения УТ. В работе [6] показано, что инициирование разложения УТ связано с превышением температурной границы деструкции вещества. Интенсивный локальный нагрев УТ может быть получен, в частности, при использовании резонансной газодинамической системы (РГС).

Проточный тракт рассматриваемой в настоящей работе РГС [7] (рис. 1) состоит из сверхзвукового сопла 1 и полуоткрытого резонатора 2, установленных на одной оси внутри камеры МГВП 3. Резонатор выполнен цилиндрическим с диаметром внутренней полости $d_{вн}$ и толщиной

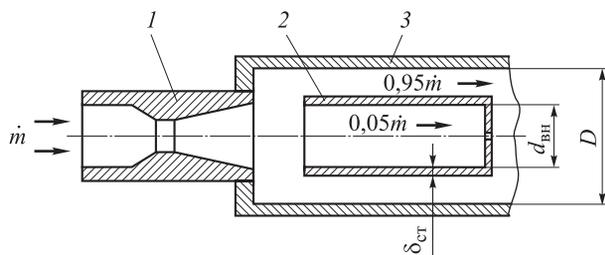


Рис. 1. Схема проточного тракта РГС:
1 — сверхзвуковое сопло; 2 — резонатор;
3 — камера МГВП

стенки $\delta_{ст}$. УТ подается в РГС через сопло 1 с массовым расходом \dot{m} , при этом непосредственно через резонатор протекает около $0,05\dot{m}$.

При определенном соотношении геометрических и режимных параметров РГС [6] в ее рабочей зоне формируется неустойчивая структура газодинамического течения, состоящая из «бочки» и диска Маха. В случае, когда диск Маха локализуется в области входной кромки резонатора в системе возникают продольные автоколебания, поддерживаемые кинетической энергией подаваемого газа. При этом в застойной зоне резонатора осуществляется интенсивный нагрев газообразного УТ. Выделение тепла обусловлено реализацией высокочастотного циклического процесса прохождения и отражения от торцевой стенки резонатора ударных волн. Высокий уровень температур в резонансной полости обеспечивает термическое разложение УТ с выделением тепла и инициирование рабочего процесса в МГВП.

После инициирования рабочего процесса в МГВП конструкция РГС подвергается воздействию высокотемпературного потока химически активной газовой смеси, состоящей из N_2O и продуктов его разложения. Данный поток может иметь температуру свыше 1 900 К с относительным массовым содержанием кислорода до 0,36.

Наиболее теплонагруженным элементом РГС является резонатор. Применение систем активного (проточного, завесного и др.) охлаждения в данном случае затруднено малыми габаритами и технологической сложностью реализации.

Таким образом, выбор работоспособного материала и теплозащитного покрытия, а также прогнозирование теплового состояния резонатора во время работы РГС является важной научно-технической задачей на этапе создания системы инициирования рабочего процесса для МГВП.

Цель работы — исследование теплового состояния резонатора РГС и разработка методов увеличения ее ресурсных характеристик.

Для достижения поставленной цели в работе проведено численное моделирование процессов теплообмена и теплопроводности при непрерывной и импульсной работе МГВП.

В работе приняты следующие допущения. После инициирования рабочего процесса с помощью РГС, в камере МГВП реализуется автоподдерживаемый режим разложения N_2O .

При этом внутрикамерное повышение давления приводит к затуханию пульсационного течения в РГС. Согласно результатам предварительных расчетов, для моделирования теплового состояния стенок резонатора после выхода МГВП на номинальный режим (по давлению в камере) осевым градиентом температуры можно пренебречь. Данное допущение соответствует равномерному течению продуктов разложения N₂O в кольцевом зазоре между резонатором и стенкой камеры МГВП. Следует подчеркнуть, что выход на режим происходит через 0,05...0,15 с после подачи N₂O.

Суммарный тепловой поток q_{Σ} , направленный от горячих газов в стенку резонатора, состоит, в общем случае, из двух составляющих: конвективного и радиационного тепловых потоков. Однако при разложении N₂O не образуются молекулы H₂O и CO₂, являющиеся основными источниками излучения газовой смеси. В связи с этим для данного УТ можно принять, что радиационный тепловой поток $q_{\text{рад}} = 0$.

Схема тепловых потоков к внутренней и наружной поверхностям стенки резонатора при включении РГС и паузе показана на рис. 2. Во время включения на внутренней поверхности стенки резонатора имеет место конвективный теплообмен с горячим газом, на наружной — конвективный теплообмен с горячим газом и радиационный теплообмен с корпусом камеры МГВП (рис. 2, а). Пауза характеризуется отсутствием теплового потока к внутренней поверхности стенки резонатора и наличием радиационного теплообмена между наружной поверхностью стенки резонатора и корпусом камеры МГВП (рис. 2, б).

В работе использована следующая физико-математическая модель. Конвективный тепловой поток от горячего газа к стенке резонатора определяется по уравнению

$$q_{\text{кон}} = \alpha_{\Gamma} (T_{\Gamma}^* - T_{\text{ст}}).$$

Здесь α_{Γ} — коэффициент теплоотдачи от горячего газа к стенке резонатора; T_{Γ}^* — температура торможения газового потока; $T_{\text{ст}}$ — температура стенки резонатора.

Принимая во внимание условия работы

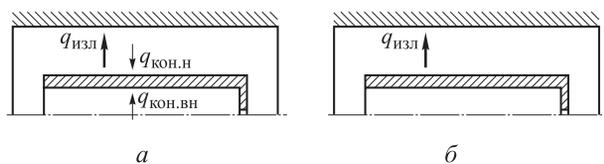


Рис. 2. Направление тепловых потоков при включении РГС (а) и паузе (б)

МГВП, для определения коэффициента теплоотдачи от горячего газа к стенке резонатора использована полуэмпирическая формула Гухмана—Илюхина [2]:

$$\frac{\alpha_{\Gamma} d_{\text{э}}}{\lambda_{\Gamma, \text{ст}}} = 0,0162 \left(\frac{\rho_{\Gamma} w C_{p \Gamma, \text{ст}} d_{\text{э}}}{\lambda_{\Gamma, \text{ст}}} \right)^{0,82} \left(\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{ст}}} \right)^{0,35},$$

где $C_{p \Gamma, \text{ст}}$ и $\lambda_{\Gamma, \text{ст}}$ — теплоемкость и коэффициент теплопроводности газа при температуре стенки соответственно; ρ_{Γ} — плотность газа; $d_{\text{э}}$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр поперечного сечения канала резонатора; w — скорость движения газа.

Эквивалентный диаметр

$$d_{\text{э}} = 4F_{\text{к}}/\Pi.$$

Здесь $F_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения канала; Π — полный периметр сечения.

Учитывая, что температура стенки МГВП меньше температуры резонатора, для определения радиационного теплового потока между ними может быть использована следующая зависимость:

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right],$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты системы; c_0 — постоянная Стефана—Больцмана, $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴); T_1 — температура внешней поверхности резонатора; T_2 — температура внутренней поверхности стенки МГВП.

Приведенная степень черноты системы

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{d_{\text{вн}} + \delta_{\text{ст}}}{D} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — степень черноты внешней поверхности резонатора и внутренней поверхности стенки МГВП соответственно.

Учитывая приведенные выше допущения, в работе рассмотрено одномерное уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{ст}}(T)}{\rho_{\text{ст}}(T) C_{p \text{ст}}(T)} \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right);$$

$$a_{\text{ст}}(T) = \frac{\lambda_{\text{ст}}(T)}{\rho_{\text{ст}}(T) C_{p \text{ст}}(T)},$$

где r — радиус; τ — время; $\lambda_{\text{ст}}(T)$ — коэффициент теплопроводности материала стенки резонатора; $\rho_{\text{ст}}(T)$ — плотность материала стенки резонатора; $C_{p \text{ст}}(T)$ — теплоемкость материала стенки резонатора; $a_{\text{ст}}(T)$ — коэффициент температуропроводности материала стенки резонатора. В работе

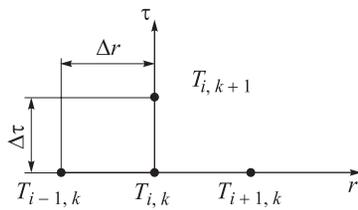


Рис. 3. Схема расположения узлов сетки

использованы полиномиальные температурные зависимости теплофизических свойств газа, материала стенки резонатора и покрытия.

Для получения разностного аналога данного уравнения в частных производных использована явная схема узлов сетки, представленная на рис. 3 и описываемая следующими уравнениями:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_{i,k} = \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta \tau};$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_{i,k} = \frac{T_{i+1,k} - T_{i-1,k}}{2\Delta \tau};$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right)_{i,k} = \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{\Delta r^2}.$$

Здесь i — номер узла по радиусу, $i = 1, 2, \dots, i_{\text{кон}}$; k — номер узла по времени, $k = 1, 2, \dots, k_{\text{кон}}$; Δr — шаг интегрирования функции по радиусу; $\Delta \tau$ — шаг интегрирования функции по времени.

После преобразования разностный аналог уравнения нестационарной теплопроводности принимает следующий вид:

$$T_{i,k+1} = \Delta \tau a_{\text{ст}}(T) \left(\frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_i} \frac{T_{i+1,k} - T_{i-1,k}}{2\Delta r} \right) + T_{i,k},$$

где r_i — текущий радиус, $r_i = (i-1)\Delta r + R_{\text{вн}}$.

Начальное условие для решения дифференциальных уравнений имеет вид

$$T = T(r, \tau) = \text{const} = T_0, \quad \tau = 0,$$

где T_0 — начальная температура резонатора.

Граничные условия и их разностный аналог определяются соответствующей геометрией резонатора:

1) граничные условия на внутренней поверхности стенки резонатора во время работы РГС:

$$\alpha_{\text{г.вн}}(T_{\text{г}}^* - T_{\text{ст.вн}}) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r};$$

$$\alpha_{\text{г.вн}}(T_{\text{г}}^* - T_{1,k}) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{2,k} - T_{1,k}}{\Delta r}.$$

Здесь $\alpha_{\text{г.вн}}$ — коэффициент теплоотдачи от горячего газа к внутренней поверхности стенки резонатора;

2) граничные условия на наружной поверхности стенки резонатора во время работы РГС:

$$\alpha_{\text{г.н}}(T_{\text{г}}^* - T_{\text{п}}) - \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{ст}}^*/100)^4 \right] =$$

$$= -\lambda_{\text{п}}(T) \frac{\Delta T_{\text{п}}(\tau)}{\delta_{\text{п}}};$$

$$\lambda_{\text{п}}(T) \frac{\Delta T_{\text{п}}(\tau)}{\delta_{\text{п}}} = \lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r};$$

$$\alpha_{\text{г.н}}(T_{\text{г}}^* - T_{\text{пк}}) - \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[(T_{\text{пк}}/100)^4 - (T_{\text{ст}}^*/100)^4 \right] =$$

$$= \lambda_{\text{п}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{\text{пк}}}{\delta_{\text{п}}};$$

$$\lambda_{\text{п}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{\text{пк}}}{\delta_{\text{п}}} = \lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{i_{\text{кон}},k}}{\Delta r},$$

где $\alpha_{\text{г.н}}$ — коэффициент теплоотдачи от горячего газа к наружной поверхности стенки резонатора; $T_{\text{ст}}^*$ — температура стенки корпуса камеры МГВП; $T_{\text{п}}$ — температура покрытия со стороны горячего газа;

3) граничные условия на внутренней поверхности стенки резонатора во время паузы:

$$\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = 0,$$

$$T_{1,k} = T_{2,k};$$

4) граничные условия на наружной поверхности стенки резонатора во время паузы:

$$-\varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{ст}}^*/100)^4 \right] = -\lambda_{\text{п}}(T) \frac{\Delta T_{\text{п}}(\tau)}{\delta_{\text{п}}};$$

$$\lambda_{\text{п}}(T) \frac{\Delta T_{\text{п}}(\tau)}{\delta_{\text{п}}} = \lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r};$$

$$-\varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[(T_{\text{пк}}/100)^4 - (T_{\text{ст}}^*/100)^4 \right] =$$

$$= -\lambda_{\text{п}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{\text{пк}}}{\delta_{\text{п}}};$$

$$\lambda_{\text{п}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{\text{пк}}}{\delta_{\text{п}}} = \lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}},k} - T_{i_{\text{кон}},k}}{\Delta r}.$$

Расчетные исследования теплового состояния стенки резонатора проводились для режимов, соответствующих испытаниям стендового образца РГС [7]. Суммарный массовый расход N_2O составлял $\dot{m} = 40$ г/с, давление газа в камере МГВП $p_{\text{г}} = 2$ МПа, температура газа $T_{\text{г}} = 1914$ К.

Внутренний диаметр резонатора и камеры рассматриваемого МГВП приняты равными $d_{вн} = 6$ мм и $D = 20$ мм соответственно, толщина стенки резонатора $\delta_{ст} = 1...3$ мм.

В качестве материалов резонатора рассмотрены сталь 12Х18Н10Т, хром-никелевый сплав ХН60ВТ и жаростойкая бронза БрХ08, ниобий (Nb) и углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) с поверхностным силицированием, теплофизические свойства которых приведены в работах [2, 8–11]. Материал корпуса камеры МГВП — сталь 12Х18Н10Т. Температура корпуса камеры МГВП принята постоянной и равной 300 К. В качестве теплозащитного покрытия на внешней поверхности резонатора рассмотрен оксид циркония $ZrO_2 + 8\% Y_2O_3$ [12], нанесенный плазменным напылением. Выбор данного покрытия обусловлен наименьшими значениями коэффициента теплопроводности и коэффициента температуропроводности.

Частота включений РГС при импульсном режиме работы составляет $f = 1$ Гц, коэффициент заполнения импульсного режима работы РГС $k_3 = 0,5$.

В связи с тем, что температура газа ниже температуры разупрочнения УУКМ с поверхностным силицированием, разрушения резонатора из этого материала не происходит и в нем устанавливается стационарный тепловой режим. Однако на данный момент производство изделий сложной геометрической конфигурации из УУКМ с поверхностным силицированием имеет ряд технологических трудностей. Кроме того, УУКМ характеризуется склонностью к механическому разрушению при циклических тепловых нагрузках и термических ударах. Данные факты требуют поиска альтернативных материалов для изготовления резонатора РГС.

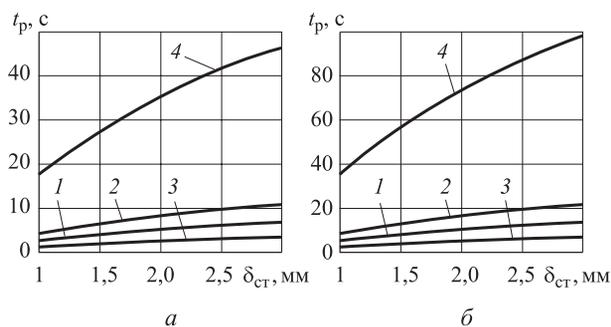


Рис. 4. Зависимость времени работы резонатора до разрушения t_p от толщины его стенки $\delta_{ст}$ при непрерывном (а) и импульсном ($f = 1$ Гц) (б) режимах работы РГС:

1 — 12Х18Н10Т; 2 — ХН60ВТ; 3 — БрХ08; 4 — Nb

Проведенные расчеты и последующий анализ результатов моделирования теплового состояния элементов конструкции РГС позволили получить зависимости времени работы резонатора до разрушения (время достижения в стенке температуры разупрочнения материала) от толщины его стенки и используемого материала на непрерывном (рис. 4, а) и импульсном (рис. 4, б) режимах работы МГВП. Следует отметить, что разрушение резонатора начинается на внешней поверхности стенки, что объясняется ее более интенсивным нагревом по сравнению с внутренней поверхностью.

Результаты расчетов показали, что при непрерывной работе РГС максимальное время до начала разрушения t_p резонатора составляет 17,5...46,5 с и может быть получено при использовании резонатора из ниобия. Применение стали 12Х18Н10Т снижает t_p в 6–7 раз, сплава ХН60ВТ — в 4 раза и сплава БрХ08 — в 13–14 раз.

При импульсной работе МГВП t_p увеличивается в 1,7–2,1 раза. Максимальные времена работы также соответствуют применению в конструкции резонатора ниобия и достигают значений 35,5...98,5 с (в зависимости от толщины резонатора). С переходом на импульсный режим работы преимущество ниобия по сравнению со сталью 12Х18Н10Т и сплавами ХН60ВТ и БрХ08 еще увеличивается.

Проведенные тестовые расчеты теплового состояния стенки резонатора МГВП, работающего в импульсном режиме с увеличенной частотой включений до 10 Гц и сохранением значения коэффициента заполнения импульсного режима $k_3 = 0,5$, показали, что увеличение частоты включений РГС не влияет на время работы резонатора до его разрушения.

Для увеличения ресурсных характеристик РГС возможно использование теплозащитных покрытий на наружной поверхности стенки резонатора.

В качестве параметра эффективности применения теплозащитного покрытия выбрано относительное увеличение времени работы резонатора

$$\Delta \bar{t} = (t_p^* - t_p) / t_p,$$

где t_p^* — время работы резонатора с теплозащитным покрытием; t_p — время работы резонатора без теплозащитного покрытия.

Наиболее эффективно применение теплозащитного покрытия на резонаторе из сплава БрХ08, наименее эффективно — на резонаторе из ниобия (рис. 5, б). Следует отметить, что с увеличением толщины стенки резонатора повышается эффективность применения теплозащитного покрытия. При переходе с непрерывного

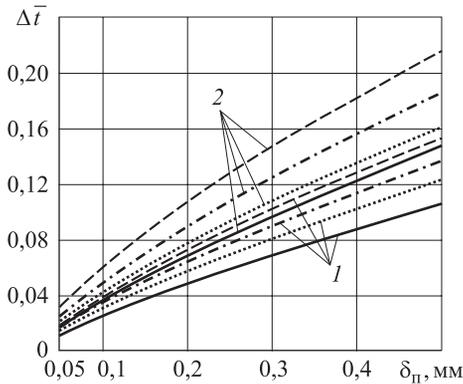


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения времени работы резонатора до разрушения $\Delta \bar{t}$ от толщины теплозащитного покрытия $\delta_{п}$ при непрерывной работе РГС:

1 — $\delta_{ст} = 1$ мм; 2 — $\delta_{ст} = 3$ мм: - - - - - сталь 12X18H10T; — сплав XH60BT; - - - - - сплав BrX08; — — — — — Nb

режима работы РГС на импульсный, $\Delta \bar{t}$ снижается на 2...3 %.

Ощутимого увеличения времени работы резонатора удается добиться за счет нанесения слоя теплозащитного покрытия толщиной около 500 мкм. При этом возможное время работы МГВП возрастет на 10...22 %. Использование покрытий толщиной более 500 мкм затруднено технологическими особенностями нанесения. Кроме того, ввиду значительных температурных напряжений при увеличении толщины покрытия они становятся склонными к отслоению, приводящему к разрушению резонатора.

Проведенные испытания стендового МГВП с РГС подтвердили результаты расчетов. Установлено, что при длительности непрерывного включения более 10 с, резонатор толщиной 2,5 мм, выполненный из сплава XH60BT без

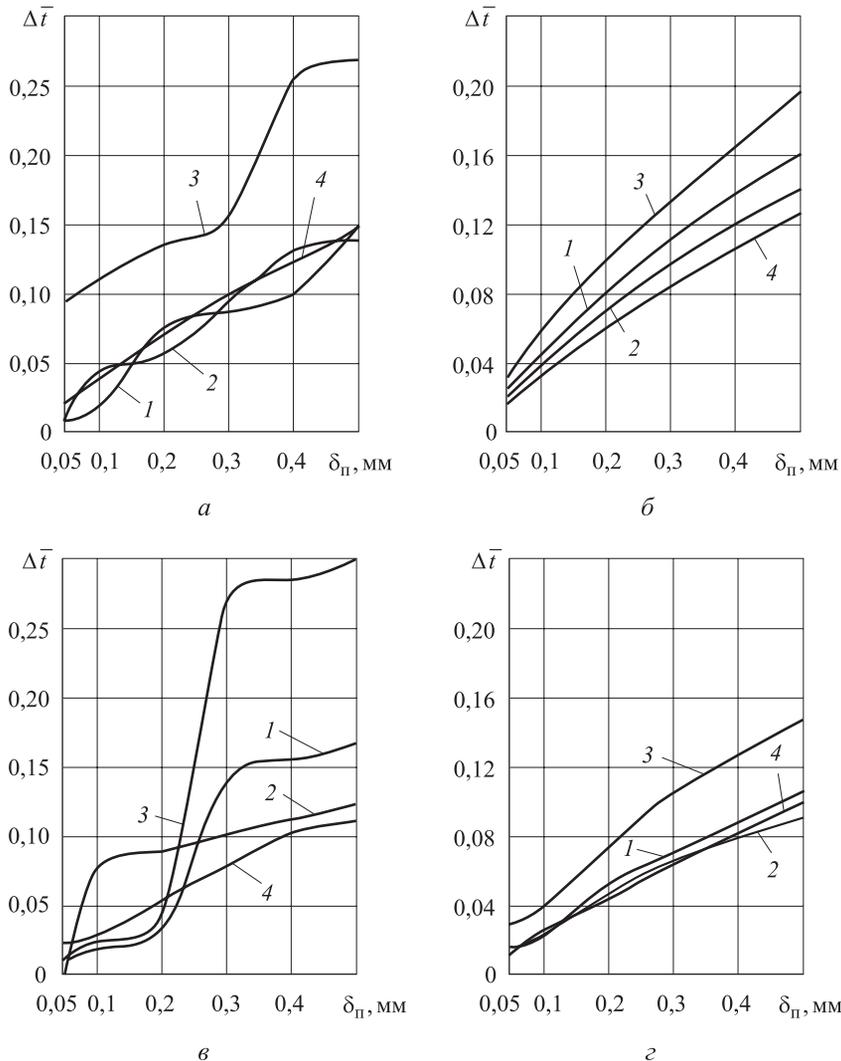


Рис. 6. Зависимость относительного увеличения времени работы резонатора до разрушения $\Delta \bar{t}$ от толщины теплозащитного покрытия $\delta_{п}$ при импульсной работе МГВП:

a — $f = 1$ Гц, $\delta_{ст} = 3$ мм; б — $f = 10$ Гц, $\delta_{ст} = 3$ мм; в — $f = 1$ Гц, $\delta_{ст} = 1$ мм; г — $f = 10$ Гц, $\delta_{ст} = 1$ мм; 1 — сталь 12X18H10T; 2 — сплав XH60BT; 3 — сплав BrX08; 4 — Nb

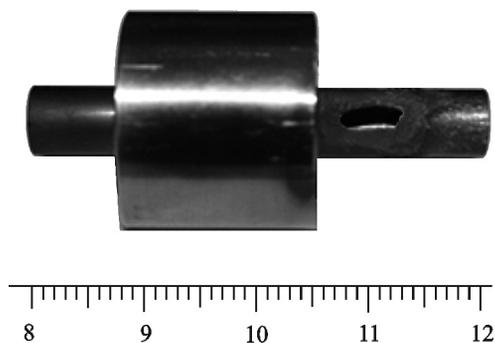


Рис. 7. Характер прогара стенки резонатора

покрытия, прогорает. При импульсных режимах время работы может быть увеличено до 15...20 с. Характер прогара резонатора (рис. 7) показывает, что начало разрушения приходится на внешнюю стенку.

Исходя из полученных результатов проведенного моделирования, можно сделать вывод, что при необходимости длительной работы МГВП с РГС целесообразно в качестве материала резонатора использовать УУКМ. Однако, учитывая низкий уровень технологической готовности производства изделий сложной геометрической конфигурации из УУКМ с поверхностным силицированием, а также склонность данного материала к механическому разрушению при циклических тепловых нагрузках, наиболее оправданным является использование ниобия. Резонатор из ниобия обеспечивает время непрерывной работы МГВП 17,5...46,5 с. В лабораторных установках, время непрерывной работы которых ограничено 10 с, допустимо использование резонатора из сплава ХН60ВТ. Следует отметить, что при импульсной работе МГВП время до начала разрушения резонатора увеличивается в 1,7–2,1 раза. Проведенные расчетные исследования показали, что применение теплозащитного покрытия из

оксида циркония толщиной около 500 мкм позволяет увеличить время работы МГВП на 10...22 %.

Выводы

1. Исследовано тепловое состояние резонатора РГС — конструктивного элемента, наиболее сильно подверженного тепловому воздействию продуктов разложения N_2O .

2. При необходимости длительной работы МГВП с РГС целесообразно в качестве материала резонатора использовать УУКМ. Однако, учитывая низкий уровень технологической готовности производства изделий сложной геометрической конфигурации из УУКМ с поверхностным силицированием, а также склонность данного материала к механическому разрушению при циклических тепловых нагрузках, наиболее оправданным является использование ниобия. Резонатор из ниобия обеспечивает 17,5...46,5 с непрерывной работы МГВП. В лабораторных установках, время непрерывной работы которых ограничено 10 с, допустимо использование резонатора из сплава ХН60ВТ.

3. При импульсной работе МГВП время до начала разрушения резонатора увеличивается в 1,7–2,1 раза.

4. Для увеличения ресурсных характеристик РГС целесообразным является использование теплозащитных покрытий на стенках резонатора. Так, применение теплозащитного покрытия из оксида циркония толщиной около 500 мкм позволяет увеличить время работы МГВП на 10...22 %.

5. Полученные результаты расчетов подтверждены экспериментом. Показано, что начало разрушения приходится на внешнюю стенку резонатора, что соответствует характеру прогара резонатора при испытаниях стендового МГВП с РГС.

Литература

- [1] Скибин В.А., ред. Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. *75 лет творческой научно-практической деятельности ЦИАМ в авиадвигателестроении*. Москва, Издательский дом «Авиамир», 2005. 656 с.
- [2] Добровольский М.В., Ягодников Д.А., ред. *Жидкостные ракетные двигатели*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
- [3] Zakirov V.A., Sweeting M., Lawrence T., Sellers J. Nitrous Oxide as a Rocket Propellant. *Acta Astronautica*, 2001, vol. 48, issue 5–12, pp. 353–362.
- [4] Воронецкий А.В., Сучков С.А., Филимонов Л.А. Особенности течения сверхзвуковых двухфазных потоков продуктов сгорания в каналах со специально формируемой системой скачков уплотнения. *Теплофизика и аэромеханика*, 2007, т. 14, № 2, с. 209–218.
- [5] Игнатов А.С., Тимошинова Т.С., Курьянов С.А., Ильичев В.А., Лебединский С.А. Разработка и моделирование испытательного стенда для экспериментальной отработки водородной паротурбинной энергоустановки. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2013, т. 9, № 4, с. 46–53.

- [6] Гуров А.А., Бадаев Ф.З., Овчаренко Л.П., Шаповал В.Н. *Химия*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 748 с.
- [7] Arefyev K.J., Berlov I.V., Zakharov V.S., Ilchenko M.A. Numerical and experimental investigation of the resonant system model sample gasdynamic ignition high-temperature flow generator. *International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, Abstracts, part II, Kazan, Russia, 2012, pp. 21–22.
- [8] Станкус С.В., Савченко И.В., Багинский А.В., Верба О.И., Прокопьев А.М., Хайрулин Р.А. Коэффициенты теплопроводности нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком интервале температур. *Теплофизика высоких температур*, 2008, т. 45, № 5, с. 795–797.
- [9] Зубченко А.С., ред. *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение, 2003. 784 с.
- [10] Александренков В.П. *Расчет наружного проточного охлаждения камеры ЖРД. Методические указания к домашнему заданию по дисциплине «Теплозащита и прочность конструкций ЖРД»*, 2012. URL: <http://wwwcdl.bmstu.ru/e1/GRD.html> (дата обращения 24 апреля 2014).
- [11] Осинцев О.Е., Федоров В.Н. *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник*. Москва, Машиностроение, 2004. 336 с.
- [12] Ножницкий Ю.А., Ткаченко Р.И., ред. Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 7. *Обеспечение прочностной надежности рабочих лопаток высокотемпературных турбин. Науч.-техн. сб.* Москва, ЦИАМ, 2008. 172 с.

References

- [1] *Tsentral'nyi institut aviatsionnogo motorostroeniia im. P.I. Baranova. 75 let tvorcheskoi nauchno-prakticheskoi deiatel'nosti v aviadvigatelistroenii* [Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov. 75 years of creative scientific activity in aircraft engine design]. Ed. Skibin V.A. Moscow, Aviamir publ., 2005. 656 p.
- [2] *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid propellant rocket engines]. Ed. Dobrovol'skii M.V., Iagodnikov D.A. Moscow, Bauman Press, 2005. 488 p.
- [3] Zakirov V., Sweeting M., Lawrence T., Sellers J. Nitrous Oxide as a Rocket Propellant. *Acta Astronautica*, 2001, vol. 48, issue 5–12, pp. 353–362.
- [4] Voronetsky A.V., Suchkov S.A., Filimonov L.A. Peculiarities of high-temperature two-phase flow of combustion products in channels with an intentionally structured system of shock-waves. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 201–210.
- [5] Ignatov A.S., Timoshinova T.S., Kur'ianov S.A., Il'ichev V.A., Lebedinskii S.A. Razrabotka ispytatel'nogo stenda dlia eksperimental'noi otrabotki vodorodnoi paroturbinnoi energoustanovki [Working out of the test bed for experimental working off of hydrogen steam turbine power installation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik Voronezh State Technical University]. 2013, vol. 9, no. 4, pp. 46–53.
- [6] Gurov A.A., Badaev F.Z., Ovcharenko L.P., Shapoval V.N. *Khimiia* [Chemistry]. Moscow, Bauman Press, 2004. 748 p.
- [7] Arefyev K.J., Berlov I.V., Zakharov V.S., Ilchenko M.A. Numerical and experimental investigation of the resonant system model sample gasdynamic ignition high-temperature flow generator. *International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, Abstracts, part II, Kazan, Russia, 2012, pp. 21–22.
- [8] Stankus S.V., Savchenko I.V., Baginskii A.V., Verba O.I., Prokop'ev A.M., Khairulin R.A. Thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients of 12Kh18N10T stainless steel in a wide temperature range. *High Temperature*, 2008, vol. 46, no. 5, pp. 731–733.
- [9] *Marochnik staley i spлавov* [Database of steels and alloys]. Ed. Zubenko A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 784 p.
- [10] Aleksandrenkov V.P. *Raschet naruzhnogo protochnogo okhlazhdeniia kamery ZhRD. Metodicheskie ukazaniia k domashnemu zadaniiu po distsipline «Teplozashchita i prochnost' konstruksii ZhRD»* [Calculation of the outer flow chamber cooling engines. Methodological guidelines for homework on the subject «Thermal insulation and structural strength LRE»]. Moscow, Bauman Press, 2012. Available at: <http://wwwcdl.bmstu.ru/e1/GRD.html> (accessed 24 April 2014).
- [11] Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy. Otechestvennyye i zarubezhnyye marki: spravochnik* [Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: directory]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 336 p.

- [12] *Novye tekhnologicheskie protsessy i nadezhnost' GTD. Vypusk 7. Obespechenie prochnostnoi nadezhnosti rabochikh lopatok vysokotemperaturnykh turbin. Nauchno-tekhnicheskii sbornik* [New processes and reliability of turbine engines. Issue 7. Ensuring strength reliability of working blades high turbines. Scientific and technical collection]. Ed. Nozhnitskii Iu.A., Tkachenko R.I. Moscow, TsIAM publ., 2008. 172 p.

Статья поступила в редакцию 05.05.2014

Информация об авторах

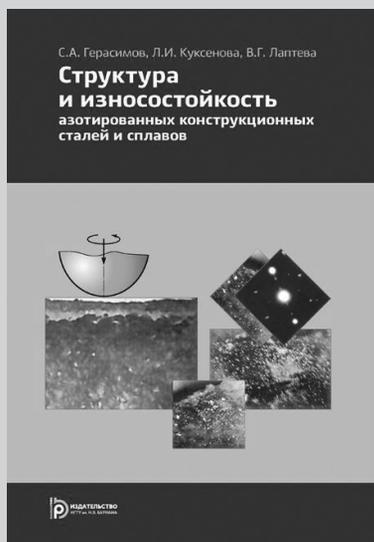
ВОРОЖЕЕВА Олеся Андреевна (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: oa-vorozheeva@mail.ru).

АРЕФЬЕВ Константин Юрьевич (Москва) — кандидат технических наук, сотрудник кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор отдела «Аэрокосмические двигатели» ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: arefyev@rambler.ru).

Information about the authors

VOROZHEEVA Olesya Andreevna (Moscow) — Post-Graduate of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: oa-vorozheeva@mail.ru).

AREFYEV Konstantin Yurievich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), employee of «Rocket Engines» Department, Bauman Moscow State Technical University. Design Engineer of «Aerospace Engines» Department, Central Institute of Aviation Motors n. a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: arefyev@rambler.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание монографии
С.А. Герасимова, Л.И. Куксеновой, В.Г. Лаптевой

«Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов»

Изложены закономерности формирования структуры поверхностного слоя при азотировании сталей и сплавов перлитного, мартенситного и аустенитного классов в зависимости от их химического состава, плотности дефектов строения матрицы и температурно-временных параметров технологического процесса. Описаны механизмы влияния строения азотированного слоя на твердость сталей и их износостойкость. Установлены основные структурные факторы, влияющие на износостойкость сталей и контактную долговечность изделий из них. Рассмотрены принципы управления структурными факторами для достижения оптимальных значений износостойкости и контактной долговечности. Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости конструкционных материалов при трении в разных условиях. С позиций эксплуатационных требований изложена проблема выбора конструкционных материалов для узлов трения технологического оборудования. В приложении представлен обширный справочный материал по триботехническим характеристикам конструкционных материалов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru