

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 641.454

DOI 10.18698/0536-1044-2016-5-91-100

Расчетные исследования теплового состояния резонатора газодинамической системы воспламенения на двухфазной топливной композиции*

О.А. Ворожеева¹, К.Ю. Арефьев^{1,2}¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2

Numerical Analysis of the Thermal State of the Resonator in a Gas-Dynamic Ignition System with Two-Phase Fuel Composition

O.A. Vorozheeva¹, K.Y. Arefyev^{1,2}¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Central Institute of Aviation Motors n. a. P.I. Baranov, 111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya str., 2

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



В настоящее время актуально применение газодинамических систем воспламенения (ГСВ), используемых при запуске современных генераторов высокоэнтальпийного потока, на базовых компонентах топлива. Высокий уровень теплового нагружения элементов конструкции ГСВ требует прогнозирования ресурсных характеристик и предельного времени ее работы. Представлены математическая модель и результаты расчетов теплового состояния наиболее теплонагруженного элемента конструкции ГСВ — резонатора. Расчеты проведены в осесимметричной нестационарной постановке с учетом конвективного и радиационного механизмов теплообмена между резонатором и продуктами сгорания, а также теплоотвода в другие элементы конструкции ГСВ. Исследовано тепловое состояние резонаторов из стали 12X18H10T, хромоникелевого сплава ХН60ВТ и жаростойкой бронзы БрХ08 при непрерывном и импульсном режимах работы ГСВ. Определены значения времени работы ГСВ до начала термомеханического разрушения резонатора. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Даны рекомендации по применению рассмотренных материалов для изготовления резонатора.

Ключевые слова: тепловое состояние, газодинамическая система воспламенения, двухфазная топливная композиция, математическое моделирование, этанол, температурное поле, резонатор, импульсный режим работы.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 14-08-01118.

i The use of gas-dynamic ignition systems (GIS) when initiating modern high-enthalpy flow generators on basic fuel components is currently relevant. The high thermal loading of the GIS structure elements requires the prediction of life characteristics and time limits of the system's operation. This paper presents the mathematical model and calculation results of the thermal state of the resonator, the most thermally loaded element of the GIS structure. The calculations are carried out in axisymmetric nonstationary settings, taking into account convective and radiative heat exchange between the resonator and the products of combustion, as well as the heat transfer to other elements of the GIS structure. The thermal state of the resonators made of 12Kh18N10T steel, KhN60VT chrome-nickel alloy and BrKh08 heat-resistant bronze is investigated when the GIS is operated in continuous and pulsed modes. The GIS operating time until the start of thermomechanical failure of the resonator is determined. A comparative analysis of the obtained results is performed. Recommendations are given on the application of the considered materials when manufacturing resonators.

Keywords: thermal state, gas-dynamic ignition system, two-phase fuel composition, mathematical modeling, ethanol, temperature field, resonator, pulsed mode.

До настоящего времени рассматривалось применение газодинамической системы воспламенения (ГСВ) в первую очередь для газообразных топливных смесей [1–3], которые в большинстве случаев использовались только в процессе запуска генератора высокоэнтальпийного потока (ГВП). В современных ГВП необходимо обеспечить работу системы воспламенения на базовых компонентах топлива. Востребованным типом горючего для ГВП (в первую очередь малогабаритных) является этанол [4–6], обладающий высокими энергетическими показателями, стабильностью горения и экологичностью, поэтому в качестве базовой топливной композиции в расчетном исследовании принята смесь воздух + этанол.

Схема рассматриваемой ГСВ в составе ГВП на двухфазных компонентах топлива приведена на рис. 1.

Из результатов предварительных расчетно-экспериментальных исследований [1, 7] извест-

но, что при надлежащем профилировании газодинамического тракта ГСВ истекающий из сопла 2 окислитель может быть нагрет в застойной зоне резонатора 3 до высоких температур (более 2 000 К). При подаче жидкого горючего через струйную форсунку 1 в периодической ударно-волновой структуре между соплом и резонатором ГСВ происходит дробление струи жидкости, в результате чего образуются капли различной дисперсности. Эти капли попадают в застойную зону резонансной полости, где вследствие высокой температуры происходит их испарение и воспламенение топливной смеси.

После воспламенения высокотемпературные продукты сгорания попадают в камеру сгорания ГВП 5, где инициируют основной рабочий процесс. При этом происходит повышение температуры газовой смеси в области резонатора до 1 800...2 200 К, что обеспечивает надежный запуск ГВП. Во время работы ГСВ все ее элементы подвергаются воздействию высокой температуры газовой смеси. Следовательно, важной задачей является прогнозирование ресурсных характеристик и предельного времени работы ГСВ.

Цель работы — математическое моделирование теплового состояния наиболее теплонагруженного элемента конструкции ГСВ — резонатора.

Расчет температурного поля в резонаторе ГСВ проводился путем решения уравнения теплопроводности в двумерной (осесимметричной) нестационарной постановке. Адаптированная для решения рассматриваемой задачи математическая модель учитывала конвектив-

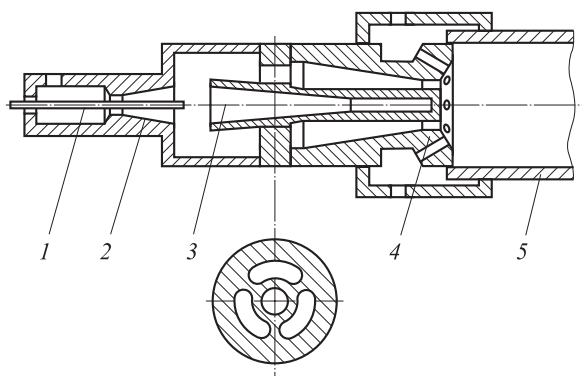


Рис. 1. Конструктивная схема ГСВ в составе ГВП:
1 — струйная форсунка подачи горючего; 2 — сопло ГСВ;
3 — резонатор; 4 — форсуночная головка ГВП;
5 — камера сгорания ГВП

ный и радиационный механизмы теплообмена между продуктами сгорания и стенкой резонатора, а также теплообмен резонатора с другими элементами конструкции ГСВ. Такой подход позволил провести расчет теплового состояния резонатора при стационарном и импульсном режимах работы ГСВ. Конструктивная схема и расчетная сетка для рассматриваемого резонатора ГСВ приведены на рис. 2, где длина резонатора $L = 40$ мм; наружный радиус резонатора $d_n = 14$ мм; $L_1 = 0,715L$; $L_2 = 0,95L$; $d_1 = 3d_n/7$ и $d_2 = d_n/7$.

При моделировании теплового состояния резонатора принято, что во время включения ГСВ на всех поверхностях стенки резонатора происходит конвективный и радиационный теплообмен с горячим газом (рис. 3, а). Во время паузы на внутренней и торцевых поверхностях стенки резонатора теплообмен отсутствовал, а наружная поверхность стенки резонатора охлаждалась путем радиационного излучения (рис. 3, б).

Суммарный тепловой поток от горячего газа к стенке резонатора

$$q_{\Sigma} = q_{\text{кон}} + q_{\text{рад}},$$

где $q_{\text{кон}}$ и $q_{\text{рад}}$ — конвективная и радиационная составляющие теплового потока.

Конвективная составляющая теплового потока от горячего газа к стенке резонатора

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

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

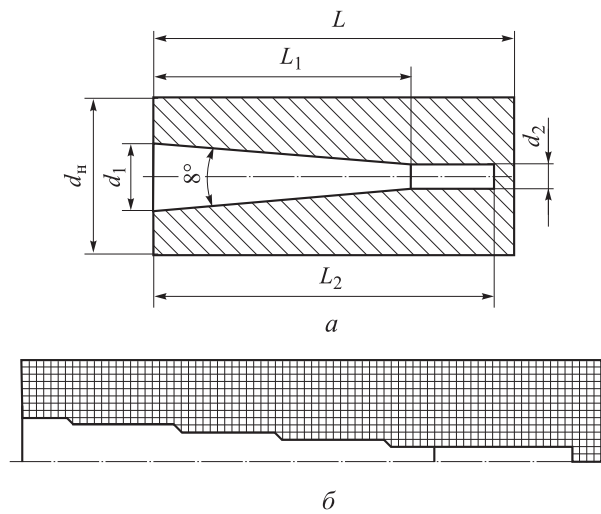


Рис. 2. Конструктивная схема (а) и расчетная сетка (б) для резонатора ГСВ

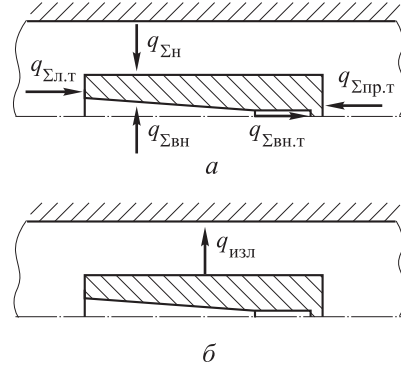


Рис. 3. Направление тепловых потоков при включении ГСВ (а) и паузе (б):

$q_{\Sigma n}$ и $q_{\Sigma vn}$ — суммарный тепловой поток от горячего газа соответственно к наружной и внутренней поверхностям стенки резонатора; $q_{\Sigma vn.t}$, $q_{\Sigma pr.t}$ и $q_{\Sigma l.t}$ — суммарный тепловой поток от горячего газа к внутренней, правой и левой торцевым поверхностям стенки резонатора; $q_{изл}$ — радиационный тепловой поток между резонатором и стенкой ГВП

Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности резонатора ГСВ получено путем численного решения уравнений газовой динамики, представленных в работе [8]. В этих расчетах принято, что температура стенки остается постоянной. Для определения зависимости коэффициента α_{Γ} от температуры стенки резонатора используем следующее уравнение:

$$\alpha_{\Gamma} = A B(T_{\text{ст}}),$$

где A — переменная, не зависящая от температуры стенки резонатора; $B(T_{\text{ст}})$ — переменная, зависящая от температуры стенки резонатора и изменяющаяся во времени, для рассматриваемой смеси воздух + этанол $B(T_{\text{ст}}) = 43T_{\text{ст}}^{-0,11}$.

Переменные имеют следующий вид:

$$A = \frac{1}{d_3} 0,0162 (\rho_{\Gamma} w d_3)^{0,82} (T_{\Gamma}^*)^{0,35};$$

$$B(T_{\text{ст}}) = \lambda_{\Gamma, \text{ст}} \left(\frac{C_{p, \Gamma, \text{ст}}}{\lambda_{\Gamma, \text{ст}}} \right)^{0,82} \left(\frac{1}{T_{\text{ст}}} \right)^{0,35},$$

где $d_3 = (4F_{\text{ж}})/\Pi$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр поперечного сечения канала резонатора ($F_{\text{ж}}$ — площадь поперечного сечения канала, Π — полный периметр сечения); ρ_{Γ} — плотность газа; w — скорость движения газа; $C_{p, \Gamma, \text{ст}}$ и $\lambda_{\Gamma, \text{ст}}$ — теплоемкость и коэффициент теплопроводности газа при температуре стенки.

Зная распределение коэффициента теплоотдачи при температуре стенки резонатора $T_{\text{ст, расч}}$, полученное в результате моделирова-

ния газодинамического течения после воспламенения топливной смеси, получим

$$\alpha_r(T_{ст}) = \alpha'_r 43 T_{ст}^{-0,11},$$

где $\alpha'_r = \alpha_r(T_{ст,расч})/B(T_{ст,расч})$.

Радиационную составляющую теплового потока [9] от излучающих продуктов сгорания в стенку камеры определим по формуле

$$q_{рад} = \varepsilon_r \sigma [T_r^4 - T_{ст}^4],$$

где ε_r — приведенная степень черноты; σ — постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_r — осредненная статическая температура продуктов сгорания в рассматриваемом сечении, которая соответствует среднему по сечению значению соотношения компонентов и определяется в результате проведения термодинамического расчета процесса горения топлива.

Приведенная степень черноты

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{г.эф} \varepsilon_{ст.эф}}{\varepsilon_{ст.эф} + \varepsilon_{г.эф} (1 - \varepsilon_{ст.эф})},$$

где $\varepsilon_{г.эф}$ — эффективная степень черноты продуктов сгорания топлива; $\varepsilon_{ст.эф}$ — эффективная степень черноты стенки, $\varepsilon_{ст.эф} = (\varepsilon_{ст} + 1)/2$ ($\varepsilon_{ст}$ — степень черноты огневой поверхности стенки).

Эффективная степень черноты продуктов сгорания топлива $\varepsilon_{г.эф}$ при отсутствии конденсированной фазы равна излучательной способности газообразных продуктов сгорания ε_r .

Излучательная способность газообразных продуктов сгорания зависит от излучательной способности паров воды ε_{H_2O} и углекислого газа ε_{CO_2} , а также от их взаимного поглощения излучения [10]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \varepsilon_{CO_2}.$$

Излучательные способности паров воды и углекислого газа определим по следующим выражениям [10]:

$$\varepsilon_{H_2O} = 4,4425 (p_{H_2O})^{0,8} l^{0,6} \left(\frac{T_r}{100} \right)^{-1};$$

$$\varepsilon_{CO_2} = 1,5306 (p_{CO_2} l)^{0,33} \left(\frac{T_r}{100} \right)^{-0,5},$$

где p_{H_2O} и p_{CO_2} — парциальные давления паров воды и углекислого газа соответственно, МПа; l — средняя длина пути луча, $l = 0,9 D_3$ (D_3 — характерный диаметр излучающего объема).

Учитывая, что температура стенки ГВП меньше температуры резонатора, для определения радиационного теплового потока между ними можно использовать следующую зависимость:

$$q_{изл} = \varepsilon_{пр} \sigma (T_1^4 - T_2^4),$$

где $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы; T_1 — температура внешней поверхности резонатора; T_2 — температура внутренней поверхности стенки ГВП.

Тогда приведенная степень черноты системы

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{d_n}{D} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где ε_1 и ε_2 — степени черноты внешней поверхности резонатора и внутренней поверхности стенки ГВП соответственно; d_n — наружный диаметр резонатора; D — внутренний диаметр камеры ГВП.

Рассмотрим двухмерное уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах [11], учитывающее радиальные и осевые тепловые потоки в стенке резонатора

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a_{ст}(T) \left(\frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right),$$

где r — геометрическая величина поперечного размера (радиус); z — геометрическая величина осевого размера (длина); τ — время; $a_{ст}(T)$ — коэффициент температуропроводности материала стенки резонатора.

Ось z цилиндрической системы координат совмещена с осью ГСВ. В работе использованы полиномиальные температурные зависимости теплофизических свойств газа и материала стенки резонатора.

Для получения разностного аналога данного уравнения в частных производных используем явную схему узлов, приведенную на рис. 4 и описываемую следующими уравнениями:

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

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

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

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

где i — номер узла по радиусу, $i = 0, 1, \dots, i_{\text{нач}} - 1, i_{\text{нач}}, i_{\text{нач}} + 1, \dots, i_{\text{кон}}$ ($i_{\text{нач}}$ и $i_{\text{кон}}$ — номер узла по радиусу, соответствующий внутренней и наружной поверхностям стенки резонатора); j — номер узла по осевой координате, $j = 0, 1, \dots, j_{\text{кон}}$ ($j_{\text{кон}}$ — номер узла по осевой координате, соответствующий длине резонатора L); k — номер узла по времени, $k = 0, 1, \dots, k_{\text{кон}}$ ($k_{\text{кон}}$ — номер узла по времени, соответствующий времени окончания расчета); $\Delta \tau$ — шаг интегрирования по времени; Δr — шаг интегрирования по радиусу; Δz — шаг интегрирования по осевой координате.

При этом шаги интегрирования удовлетворяют соотношению [12], которое обеспечивает положительный коэффициент при $T_{i,j,k}$ в уравнении теплопроводности:

$$0 \leq a_{\text{ст}}(T) \Delta \tau \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \leq 0,5.$$

После преобразования разностный аналог уравнения нестационарной теплопроводности принимает вид

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

где r_i — текущий радиус, $r_i = i\Delta r$.

При решении дифференциальных уравнений использованы следующие начальное и граничные условия.

Начальное условие:

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

где T_0 — начальная температура резонатора.

Граничные условия и их разностный аналог во время работы ГСВ:

• на всех поверхностях стенки резонатора:

$$\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} + q_{\text{кон}} + q_{\text{рад}} = 0;$$

$$\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} + q_{\text{кон}} + q_{\text{рад}} = 0;$$

$$\alpha_{\Gamma} = \alpha'_{\Gamma} 43T_{\text{ст}}^{-0,11},$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности материала стенки резонатора;

• на внутренней поверхности стенки резонатора:

$$\alpha_{\Gamma i_{\text{нач}},j,k} (T_{\Gamma i_{\text{нач}},j}^* - T_{i_{\text{нач}},j,k}) + \varepsilon_{r i_{\text{нач}},j} \sigma \times (T_{\Gamma i_{\text{нач}},j}^4 - T_{i_{\text{нач}},j,k}^4) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i_{\text{нач}}+1,j,k} - T_{i_{\text{нач}},j,k}}{\Delta r};$$

$$\alpha_{\Gamma i_{\text{нач}},j,k} = \alpha'_{\Gamma i_{\text{нач}},j} 43T_{i_{\text{нач}},j,k}^{-0,11};$$

• на наружной поверхности стенки резонатора:

$$\alpha_{\Gamma i_{\text{кон}},j,k} (T_{\Gamma i_{\text{кон}},j}^* - T_{i_{\text{кон}},j,k}) + \varepsilon_{r i_{\text{кон}},j} \sigma \times (T_{\Gamma i_{\text{кон}},j}^4 - T_{i_{\text{кон}},j,k}^4) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}}-1,j,k} - T_{i_{\text{кон}},j,k}}{\Delta r};$$

$$\alpha_{\Gamma i_{\text{кон}},j,k} = \alpha'_{\Gamma i_{\text{кон}},j} 43T_{i_{\text{кон}},j,k}^{-0,11};$$

• на левой торцевой поверхности стенки резонатора:

$$\alpha_{\Gamma i,1,k} (T_{\Gamma i,1}^* - T_{i,1,k}) + \varepsilon_{r i,1} \sigma (T_{\Gamma i,1}^4 - T_{i,1,k}^4) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i,2,k} - T_{i,1,k}}{\Delta z};$$

$$\alpha_{\Gamma i,1,k} = \alpha'_{\Gamma i,1} 43T_{i,1,k}^{-0,11};$$

• на правой торцевой поверхности стенки резонатора:

$$\alpha_{\Gamma i,j_{\text{кон}},k} (T_{\Gamma i,j_{\text{кон}}}^* - T_{i,j_{\text{кон}},k}) + \varepsilon_{r i,j_{\text{кон}}} \sigma \times$$

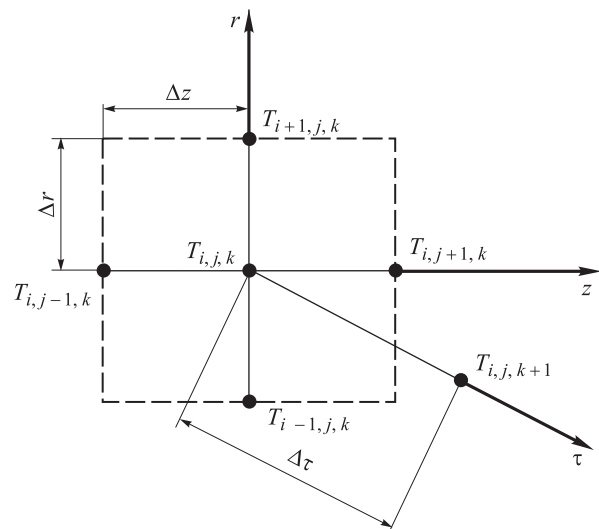


Рис. 4. Схема расположения узлов сетки

$$\times (T_{\Gamma i, j_{\text{кон}}}^4 - T_{i, j_{\text{кон}, k}}^4) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i, j_{\text{кон}}-1, k} - T_{i, j_{\text{кон}, k}}}{\Delta z};$$

$$\alpha_{\Gamma i, j_{\text{кон}, k}} = \alpha'_{\Gamma i, j_{\text{кон}}} 43T_{i, j_{\text{кон}, k}}^{-0,11};$$

• на внутренней торцевой поверхности стенки резонатора:

$$\alpha_{\Gamma i, j_{\text{вн}, k}} (T_{\Gamma i, j_{\text{вн}}}^* - T_{i, j_{\text{вн}, k}}) + \varepsilon_{r i, j_{\text{вн}}} \sigma (T_{\Gamma i, j_{\text{вн}}}^4 - T_{i, j_{\text{вн}, k}}^4) = -\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i, j_{\text{вн}+1, k} - T_{i, j_{\text{вн}, k}}}{\Delta z};$$

$$\alpha_{\Gamma i, j_{\text{вн}, k}} = \alpha'_{\Gamma i, j_{\text{вн}}} 43T_{i, j_{\text{вн}, k}}^{-0,11}.$$

Граничные условия во время паузы:

• на внутренней поверхности стенки резонатора:

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

$$T_{i_{\text{нач}}, j, k} = T_{i_{\text{нач}+1, j, k};$$

• на наружной поверхности стенки резонатора:

$$\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} - q_{\text{изл}} = 0;$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} \sigma [T_{i_{\text{кон}}, j, k}^4 - (T_{\text{ст}}^*)^4] = \lambda_{\text{ст}}(T) \frac{T_{i_{\text{кон}}-1, j, k} - T_{i_{\text{кон}}, j, k}}{\Delta r};$$

• на левой торцевой поверхности стенки резонатора:

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

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

• на правой торцевой поверхности стенки резонатора:

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

$$T_{i, j_{\text{кон}}, k} = T_{i, j_{\text{кон}}-1, k};$$

• на внутренней торцевой поверхности стенки резонатора:

$$\lambda_{\text{ст}}(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} = 0, \quad z = L_2;$$

$$T_{i, j_{\text{вн}}, k} = T_{i, j_{\text{вн}+1, k}.$$

Расчетные исследования по предложенной математической модели проведены для резонаторов из стали 12Х18Н10Т, хром-никелевого сплава ХН60ВТ и жаростойкой бронзы БрХ08 при непрерывном и импульсном режимах ра-

боты ГСВ. В импульсном режиме частота включений работы ГСВ составляла $f = 1$ Гц, при этом время включения ГСВ τ_p и время паузы τ_n равны ($\tau_p = \tau_n = 0,5$ с).

В качестве двухфазной топливной композиции рассматривали топливную пару воздух (газ) + этанол (жидкость) при среднем давлении газа в камере ГВП $p_{\Gamma} = 2,5$ МПа и суммарном расходе топлива $\dot{m} = 150$ г/с. При этом температура торможения газового потока в камере ГВП $T_{\Gamma}^* = 2341,63$ К, а парциальные давления углекислого газа и паров воды соответственно составляли $p_{\text{CO}_2} = 0,32005$ МПа и $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,30668$ МПа. Результаты газодинамических расчетов в виде распределения коэффициента теплоотдачи от горячего газа к стенке резонатора (при температуре стенки $T_{\text{ст}} = 300$ К) приведены на рис. 5.

Результаты численного исследования позволили получить распределение температуры в стенке резонатора, а также определить значения времени работы ГСВ на непрерывном $t_{\text{р.непр}}$ и импульсном $t_{\text{р.имп}}$ режимах до начала разрушения резонатора, выполненного из различных материалов (см. таблицу). Условием разрушения резонатора является достижение в

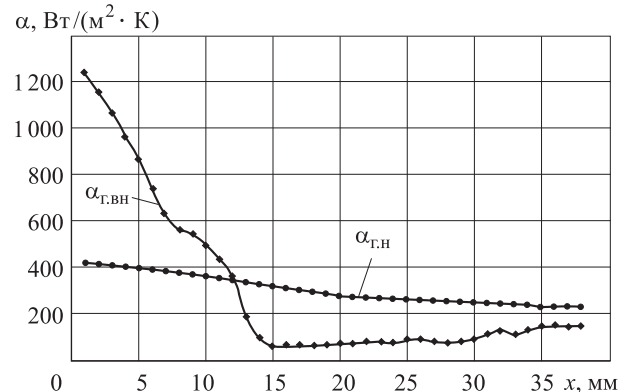


Рис. 5. Распределение коэффициента теплоотдачи от горячего газа к внутренней $\alpha_{\text{Г,вн}}$ и наружной $\alpha_{\text{Г,н}}$ поверхностям стенки резонатора при $T_{\text{ст}} = 300$ К

Значения времени работы ГСВ до начала термомеханического разрушения резонатора

Параметр	Материал резонатора		
	Сталь 12Х18Н10Т	Сплав ХН60ВТ	Бронза БрХ08
$T_p, \text{ К}$	1 070	1 270	850
$t_{\text{р.непр}}, \text{ с}$	2,736	5,411	2,655
$t_{\text{р.имп}}, \text{ с}$	6,297	12,463	5,417

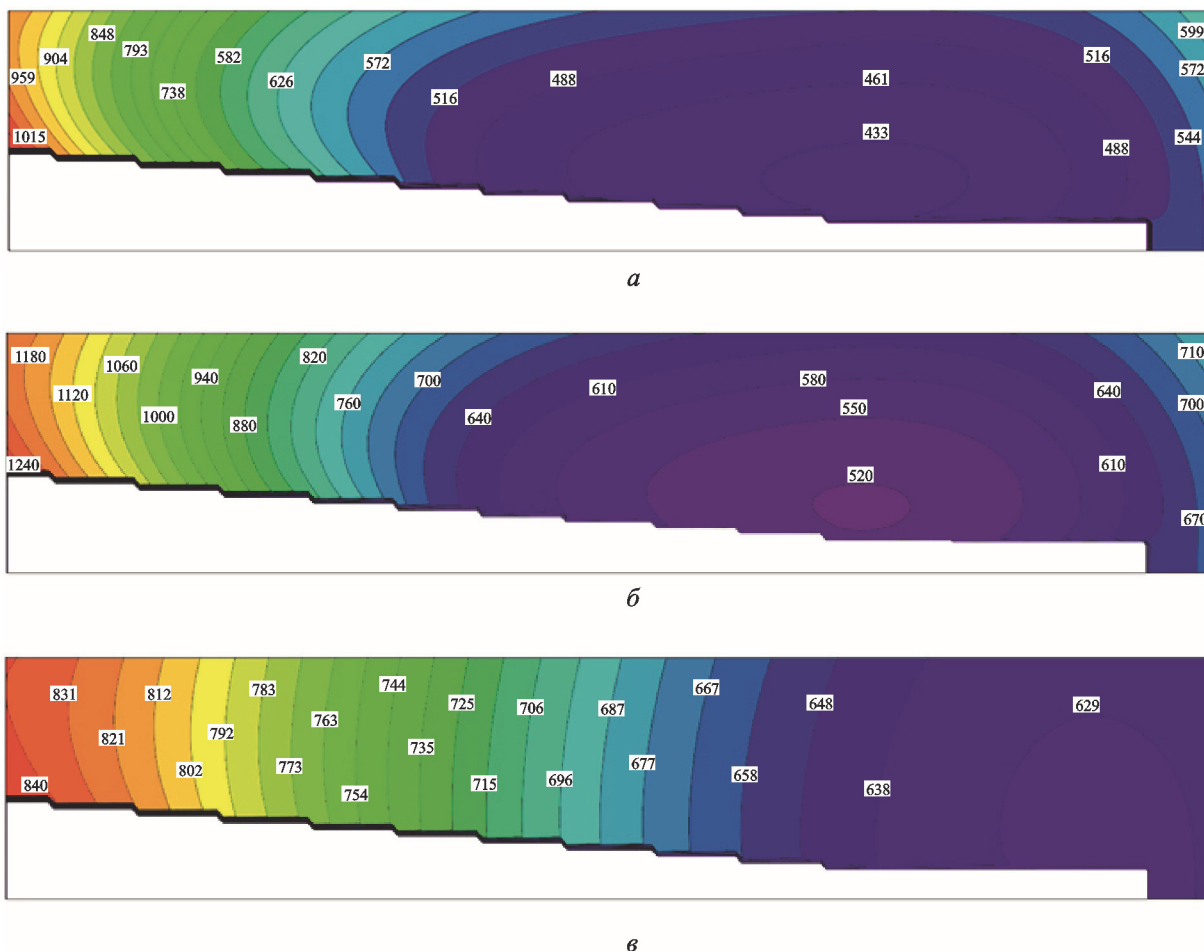


Рис. 6. Поля температур в резонаторе из стали 12X18H10T (а), сплава ХН60ВТ (б) и бронзы БрХ08 (в) при непрерывном режиме работы ГСВ

его стенке температуры разупрочнения материала T_p .

При непрерывной работе ГСВ максимальное время до начала разрушения резонатора получено при использовании сплава ХН60ВТ. Применение в качестве материалов резонатора стали 12X18H10T и бронзы БрХ08 снижает время $t_{p,непр}$ соответственно в 1,98 и 2,03 раза. Следует отметить, что ресурсные характеристики резонаторов из стали 12X18H10T и бронзы БрХ08 практически совпадают (различия не превышают 3%), что объясняется высокой теплопроводностью бронзы при ее меньшей допустимой температуре относительно стали 12X18H10T. В связи с этим предпочтительным материалом для резонатора непрерывно работающей ГСВ является сплав ХН60ВТ.

При импульсной работе ГСВ время до разрушения резонаторов из сплава ХН60ВТ и стали 12X18H10T увеличивается примерно в 2,3 раза, а резонатора из бронзы БрХ08 — в 2 раза.

Максимальное время работы до начала разрушения резонатора также получено при использовании сплава ХН60ВТ. С переходом на импульсный режим работы преимущество сплава ХН60ВТ и стали 12X18H10T по сравнению со сплавом БрХ08 увеличивается. Это является следствием относительно небольших радиационных тепловых потоков в процессе паузы для резонатора из бронзы.

На рис. 6 и 7 представлены поля температур в момент начала разрушения резонатора при непрерывной и импульсной работе ГСВ, которые позволяют оценить распределение температур в стенке резонаторов, выполненных из стали 12X18H10T, сплава ХН60ВТ и бронзы БрХ08.

По характеру изотерм видно, что начало разрушения резонатора начинается на левом торце на поверхности внутреннего канала для всех рассмотренных материалов, что соответствует области с максимальными значениями коэффициента теплоотдачи от газа к стенке.

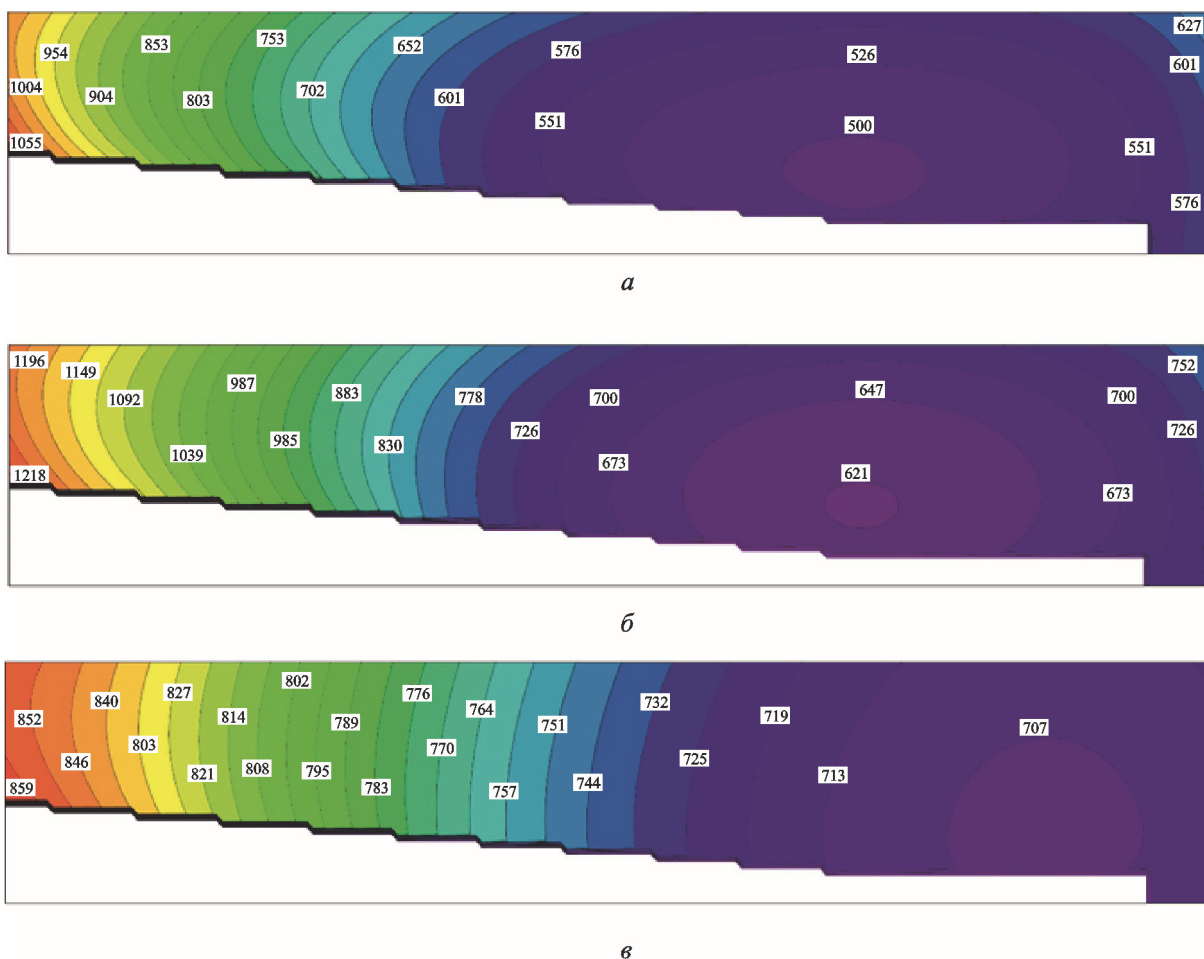


Рис. 7. Поля температур в резонаторе из стали 12X18H10T (а), сплава ХН60ВТ (б) и бронзы БрХ08 (в) при импульсном режиме работы ГСВ

Для материалов с низкими коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, таких как сплав ХН60ВТ и сталь 12X18H10T, характерен неравномерный прогрев стенки резонатора (разница температур в резонаторе в момент разрушения может составлять 550...580 К). Бронза БрХ08 обеспечивает более равномерный прогрев стенки резонатора (разница температур может быть уменьшена до 150...210 К). Следует отметить, что при импульсном режиме работы ГСВ стенка резонатора прогревается более равномерно, чем при непрерывном. Это объясняется аккумуляцией

тепла в процессе включения и перераспределением тепла в конструкции во время паузы.

Выводы

1. Применение металлических материалов при изготовлении резонатора обеспечивает работу ГСВ на непрерывном режиме в течение 5,4 с, а на импульсном — 12,5 с.
2. При необходимости длительной работы ГСВ целесообразно рассмотреть возможность выполнения резонатора из перспективных жаростойких материалов.

Литература

- [1] Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Захаров В.С. Расчетно-теоретическое исследование резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД малой тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 31–41.
- [2] Thompson P.A. *Resonance tubes: PhD Thesis*. Massachusetts, Inst. of Technology, 1960. 121 p.

- [3] Купцов В.М., Семенов В.В. Газодинамический нагреватель с диффузором. *Известия вузов. Авиационная техника*, 1989, № 4, с. 44–47.
- [4] Карпов С.А. Преимущества топливного этанола перед метанолом и его производными: обзор. *Экология промышленного производства*, 2007, № 1, с. 57–63.
- [5] Шпак В.С., Шаповалов О.И., Карташов Ю.И., Румянцев В.Н., Сердюк В.В., Ашеинази Л.А. Топливный этанол и экология. *Химическая промышленность*, 2006, т. 83, № 2, с. 89–96.
- [6] Yu J., Zhang X., Tan T. An novel immobilization method of *Saccharomyces cerevisiae* to sorghum bagasse for ethanol production. *Journal of Biotechnology*, 2007, vol. 129 (3), pp. 415–420.
- [7] Воронецкий А.В., Полянский А.Р., Арефьев К.Ю. Численный анализ неконсервативных акустических систем применительно к устройствам инициации рабочего процесса в генераторах высокоэнтальпийных потоков. [Электронный ресурс]. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 2. URL: <http://www.technomag.edu.ru/doc/339499.html>. 77-30569/339499. (дата обращения 15 марта 2012).
- [8] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Методы исследования нестационарных процессов в газодинамической системе воспламенения топливной смеси. *Мат. 14-й Междунар. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики»*. Москва, ЦАГИ, 2014, с. 6–7.
- [9] Коротеев А.С., ред. *Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование*. Москва, Машиностроение, 2008. 512 с.
- [10] Кудрявцев В.М., ред. *Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Высшая школа, 1993. 367 с.
- [11] Кузьмин М.П., Лагун И.М. *Нестационарный тепловой режим элементов конструкции двигателей летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1988. 240 с.
- [12] Авдудевский В.С., Кошкин В.К., ред. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Москва, Машиностроение, 1992. 528 с.

References

- [1] Voronetskii A.V., Arefev K.Iu., Zakharov V.S. Raschetno-teoreticheskoe issledovanie rezonansnoi sistemy gazodinamicheskogo vosplamneniia ZhRD maloi tiagi [Computational-Theoretical Study of Resonant System of Gasdynamical Ignition for Low-Thrust Liquid-Propellant Rocket Engines]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2012, no. 1, pp. 31–41.
- [2] Thompson P.A. *Resonance tubes: PhD Thesis*. Massachusetts, Inst. of Technology, 1960. 121 p.
- [3] Kuptsov V.M., Semenov V.V. Gazodinamicheskii nagrevatel' s diffuzorom [The gas-dynamic heater with a diffuser]. *Izvestiia vuzov. Aviatsonnaia tekhnika* [Russian Aeronautics]. 1989, no. 4, pp. 44–47.
- [4] Karpov S.A. Preimushchestva toplivnogo etanola pered metanolom i ego proizvodnymi: obzor [Advantages of fuel ethanol to methanol and its derivatives: a review]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industrial production]. 2007, no. 1, pp. 57–63.
- [5] Shpak V.C., Shapovalov O.I., Kartashov Iu.I., Rumiantsev V.N., Serdiuk V.V., Asheinazi L.A. Toplivnyi etanol i ekologiia [Fuel ethanol and ecology]. *Khimicheskaiia promyshlennost'* [Industry & Chemistry]. 2006, vol. 83, no. 2, pp. 89–96.
- [6] Yu J., Zhang X., Tan T. An novel immobilization method of *Saccharomyces cerevisiae* to sorghum bagasse for ethanol production. *Journal of Biotechnology*, 2007, vol. 129 (3), pp. 415–420.
- [7] Voronetskii A.V., Polianskii A.R., Arefev K.Iu. Chislennyi analiz nekonservativnykh akusticheskikh sistem primenitel'no k ustroistvam initsiatsii rabochego protsesssa v generato-rakh vysokoental'piinykh potokov [Numerical analysis of non-conservative acoustic systems for working process initialization devices in high-enthalpy flow generators]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2012, no. 2. Available at: <http://www.technomag.edu.ru/doc/339499.html> (accessed 15 Mach 2012).

- [8] Aleksandrov V.Iu., Arefev K.Iu., Il'chenko M.A. Metody issledovaniia nestatsionarnykh protsessov v gazodinamicheskoi sisteme vosplameniia toplivnoi smesi [Methods of study non-stationary processes in the gas-dynamic system of ignition of the fuel mixture]. *Mat. 14 mezhdunar. shkoly-seminara «Modeli i metody aerodinamiki»* [Materials 14 international school-seminar «Models and methods of aerodynamics»]. Moscow, CAGI, 2014, pp. 6–7.
- [9] *Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie* [Work processes in liquid rocket engines and their modeling]. Ed. Koroteev A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 512 p.
- [10] *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* [Fundamentals of the theory and calculation of liquid-propellant rocket engines]. Ed. Kudriavtsev V.M. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 1993. 367 p.
- [11] Kuz'min M.P., Lagun I.M. *Nestatsionarnyi teplovoi rezhim elementov konstruksii dvigatelei letatel'nykh apparatov* [Non-stationary thermal regime elements aircraft engine design]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 240 p.
- [12] *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in the aviation and space technology]. Ed. Avduevskii V.S., Koshkin V.K. Moscow, Mashinostroenie publ., 1992. 528 p.

Статья поступила в редакцию 20.02.2016

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) — Postgraduate, Department of Rocket Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, 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 (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya str., 2, e-mail: arefyev@rambler.ru).