

УДК 536.244+621.565.958.2

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНЕРТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

© Бортников Р.А., Сальников А.Ф.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Российская Федерация

e-mail: borneo.pstu@yandex.ru

Инертные металлические теплообменники устанавливаются в газогенераторах для охлаждения продуктов сгорания твердотопливных зарядов. Подобные агрегаты применяются как на борту летательных аппаратов, так и в системах наземного базирования в качестве источников давления в исполнительных механизмах или аэрозолей со специальными свойствами. В работе [1] рассмотрены различные конфигурации теплообменников с круглыми каналами, определены их оптимальные габаритно-массовые характеристики. Целью данной работы является выполнение исследования термодинамических процессов в газогенераторе с теплообменником, аккумулирующим тепло продуктов сгорания по объему.

Теплообменники должны обладать достаточной теплоемкостью, небольшим гидродинамическим сопротивлением и развитой поверхностью теплообмена. Этим требованиям соответствует *высокопористый проницаемый ячеистый материал* ВПЯМ, разработанный в Научном центре порошкового материаловедения (ПНИПУ, г. Пермь).

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу сопряженного теплообмена продуктов сгорания твердого топлива  $T_{f,ex} = 1513 \text{ K}$  с охлаждающим их пористым металлическим каркасом (ВПЯМ)  $T_{s,0} = 293 \text{ K}$  в линейной нестационарной постановке. Инструментом исследования является система *Maple*.

Физические процессы в газогенераторе (рис. 1, а) включают в себя горение воспламенителя (1), прогрев, зажигание и горение твердого топлива (2), течение продуктов сгорания в теплообменнике из ВПЯМ (3). На рис. 1, б показана расчетная схема теплообменника в приведенных координатах длины  $X=x/L$  и времени  $\tau=(\lambda t/\rho c)_s$ .

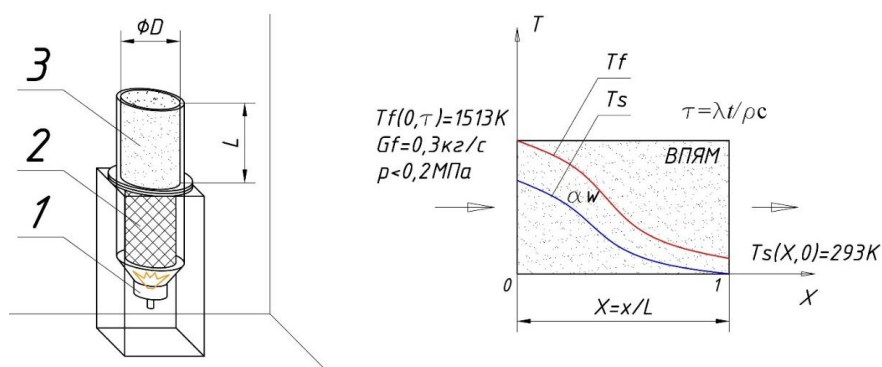


Рис. 1. Газогенератор с инертным теплообменником:  
а – принципиальная схема; б – расчетная схема ТО

Математически задача формулируется уравнениями энергии (1) и теплопроводности (2), с начальными и граничными условиями (3). Теплоотдача определяется критериальным уравнением для числа Нуссельта (4) [2].

$$\partial T_f / \partial X = -Nu \cdot f_w \cdot L / \varepsilon_V \cdot Pe \cdot (T_f - T_s); \quad (1)$$

$$\partial T_s / \partial \tau - \partial T_s^2 / \partial X^2 = \varepsilon_V \cdot \alpha_w \cdot f_w \cdot L^2 / \lambda_s \cdot (T_f - T_s); \quad (2)$$

$$T_f(0, \tau) = T_{f,ex}; \quad T_s(X, 0) = T_0; \quad (3)$$

$$\partial T_s(0, \tau) / \partial X = -Bi_0 \cdot (T_f - T_s(0, \tau));$$

$$\partial T_s(1, \tau) / \partial X = Bi_1 \cdot (T_f - T_s(1, \tau));$$

$$Nu = 0,606 \cdot Re^{0,56} \cdot Pr^{0,4} \cdot \varepsilon_V; \quad (4)$$

здесь  $\varepsilon_V$  – коэффициент объёмной пористости,  $f_w$ ,  $m^{-1}$  – удельная поверхность пористости,  $\alpha_w = Nu \cdot \lambda_f / R$ ,  $Bm / (m^2 K)$  – коэффициент теплоотдачи,  $Bi_0 = Bi_1 = \alpha_w \cdot L / \lambda_s$  – число Био на входе и выходе,  $Pe = w_f \cdot D / a_f$  – число Пекле;  $w_f$  – скорость фильтрации,  $a_f = (\lambda \rho \cdot c)_f$ .

Результаты интегрирования системы (1)-(4) показаны на совмещённом графике, рис.2. Температурный профиль продуктов сгорания  $T_f$  охлаждается по длине тракта и по мере прогрева металлического каркаса  $T_s$ , продвигается в осевом направлении.

Изменение энтальпии газа на входе и выходе из ВПЯМ отнесённое к его массе  $\Delta H / m > 70$  кДж/кг., что соответствует матричному теплообменнику [1]. В целом, применение ВПЯМ в низкотемпературных газогенераторах позволяет получить компактные и эффективные конструкции.

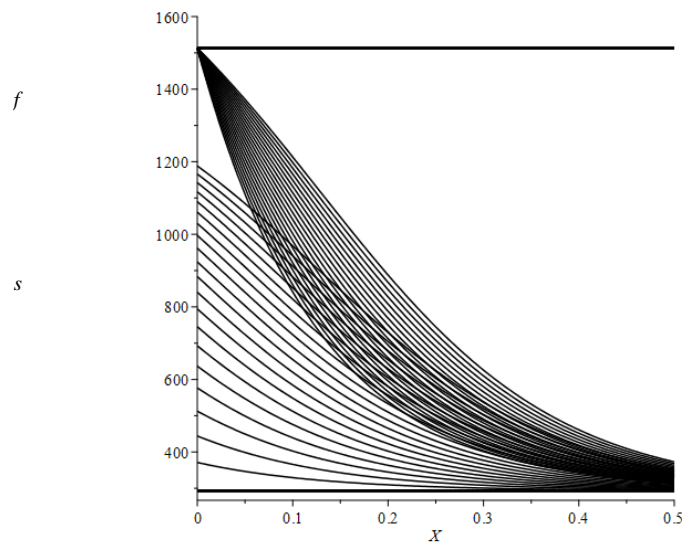


Рис. 2. Температурные профили продуктов сгорания  $T_f$  и ВПЯМ  $T_s$  в различные моменты времени  $\tau$ ;  $\varepsilon_V = 0,88$ ,  $f_w \approx 1858 m^{-1}$ ,  $D = 0,24 m$

### Библиографический список

1. Бортников Р.А., Потапов Б.Ф. Проектирование и оптимизация габаритно-массовых характеристик генераторов огнетушащего аэрозоля с инертным теплообменником // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2008. № 3 (39). С. 6–8.
2. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А., Башкирцев Г.В. Математическая модель тепловых процессов и методика исследования теплоотдачи в пористом цилиндре // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 90–96.