

*В.А. Дуреев, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

## **УЧЕТ МОДЕЛИ ПОРИСТОГО ТЕЛА В ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ**

(представлено д.т.н. Басмановым А.Е.)

Проведена оценка влияния модели пористого тела на прогрев композиционного теплозащитного покрытия. Предложен способ определения температурного поля с учетом геометрических размеров пор.

**Ключевые слова:** стационарное поверхностное разрушение композиционного теплозащитного покрытия, пористость, параметр пористости.

**Постановка проблемы.** Передача тепла вглубь композиционного теплозащитного покрытия (КТЗП) при высокоинтенсивном тепловом воздействии зависит не только от состава и структуры материала, но и от характера его разрушения. Так, образование пор в поверхностном слое разрушающегося КТЗП, способно экранировать часть тепловых потоков направленных вглубь материала. В то же время, стенки пор, воспринимая энергию излучения, одновременно испускают её, внося радиационную составляющую в теплопроводность материала.

Учитывая принятую модель пористого тела, можно снизить расчетное значение прогрева КТЗП или обеспечить приоритетный механизм его разрушения. Следовательно, разработка модели теплового разрушения КТЗП связана с учетом влияния формы и размеров пор материала на тепловой баланс покрытия.

Таким образом, существует проблема улучшения технических данных теплозащитных покрытий.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [1] пористый материал рассмотрен как система, состоящая из чередующихся между собой плоских слоев твердого и газообразного вещества. Рассмотрены два предельных случая: тепловой поток передается перпендикулярно и параллельно слоям. В первом варианте термическая связь между отдельными элементами тела в направлении потока тепла совершенно отсутствует. Во втором – условия контакта между отдельными элементами тела в направлении потока тепла идеальные.

В [2] исследовано внутреннее испарение КТЗП в моделях пор "песок" и "дерево". В первом случае структура пор в материале обладает высокой проницаемостью, и давление в порах не возрастает настолько, чтобы подавить испарение. Внутреннее испарение ограничено скоростью, с которой масса покидает поверхность материала. Во втором случае рассматриваются цилиндрические поры, которые ветвятся подобно дереву. Отмечено, что усложнение модели пористого тела, хотя и позво-

ляет оценить давление газа в порах, качественно не затрагивает определение температурного поля.

**Постановка задачи и ее решение.** Учтем модель пористости в виде системы, состоящей из чередующихся между собой плоских параллельных слоев твердого и газообразного вещества [1] в модели стационарного поверхностного разрушения композиционного покрытия [3].

Пористая ячейка имеет форму параллелепипеда высотой  $h$ . При высоких температурах, стенки пор воспринимают энергию излучения и одновременно испускают её, внося необходимость учета радиационной составляющей теплопроводности

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_s(1 - \Pi) + \lambda_g \Pi + \lambda_R, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\Sigma}$  – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/мК;  $\lambda_s$  – коэффициенты теплопроводности твердой фазы, Вт/мК;  $\lambda_g$  – коэффициенты теплопроводности газообразной фазы, Вт/мК;  $\Pi$  – пористость материала.

В случае однократного отражения энергии с поверхности пор, коэффициент радиационной теплопроводности имеет вид [4]

$$\lambda_R = (4\varepsilon^2 \sigma T^3 h), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  $T$  – температура стенки поры, К;  $h$  – высота поры, м.

Уравнение сохранения энергии внутри КТЗП [3] с учетом влияние пор (1), (2) имеет вид:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{d^2 T(\xi)}{d\xi^2} + (\rho c)_{\Sigma} V_s \frac{dT(\xi)}{d\xi} - c_g G_g \frac{dT(\xi)}{d\xi} - Q^* = 0; \quad (3)$$

$$(\rho c)_{\Sigma} = (1 - \Pi_M)(\rho c)_s + \Pi_M(\rho c)_g; \quad (4)$$

$$\Pi_M = \varphi_{CM} h_g, \quad (5)$$

где  $T$  – текущая температура, К;  $\xi$  – координата в подвижной системе координат, м;  $V_s$  – линейная скорость уноса поверхности ТЗП, м/с;  $G_g$  – расход газообразных продуктов разрушения, кг/м<sup>2</sup>с;  $Q^*$  – объемный сток тепла, обусловленный тепловым эффектом физико-химических превращений, Вт/м<sup>3</sup>;  $\Pi_M$  – массовая пористость;  $(\rho c)_g$  – плотность кг/м<sup>3</sup> и теплоемкость Дж/кгК газообразной фазы;  $(\rho c)_s$  – плотность кг/м<sup>3</sup> и теплоемкость Дж/кгК твердой фазы;  $\varphi_{CM}$  – массовая доля смолы;  $h_g$  – массовая доля газообразных продуктов реакции.

Граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} -\lambda_{\Sigma} \frac{dT(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = AI_0\kappa_{\Sigma} - (V_S \rho + G_g) \Gamma H - \varepsilon \sigma T_S^4 - q_{ВД}; \\ T(\xi) \Big|_{\xi=\infty} = T_0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $A$  – поглощательная способность поверхности;  $I_0$  – плотность ТП, Вт/м<sup>2</sup>;  $\kappa_{\Sigma}$  – коэффициент поглощения ТП в парах;  $\Gamma$  – параметр газификации;  $H$  – скрытая теплота разрушения ТЗП, Дж/кг;  $q_{ВД}$  – тепловой эффект вдува образовавшихся газов, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_0$  – начальная температура КТЗП, К.

На рис. 1 показано графическое решение задачи (3 ÷ 6), при заданных значениях величины ТП и высоты пор. Материал КТЗП – рефразил [1], величина ТП:  $I_0 = 10^8$ , Вт/м<sup>2</sup> [1, 3]. Высота пор:  $h_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ , м;  $h_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ , м;  $h_3 = 4 \cdot 10^{-3}$ , м [2].

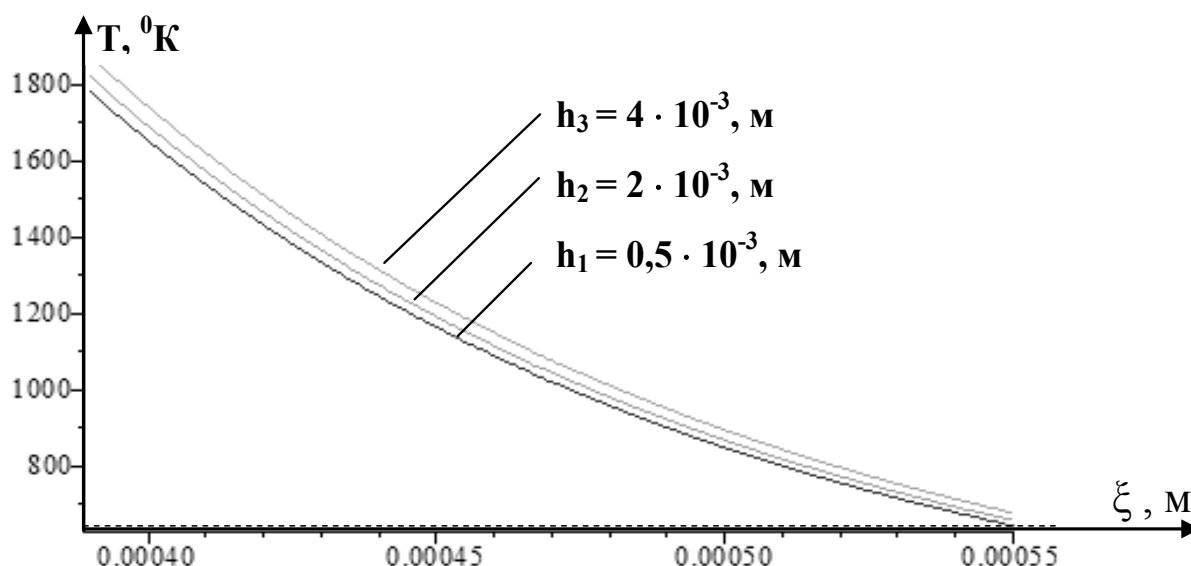


Рис. 1. Температурное поле в КТЗП с учетом высоты пор

Анализ температурных полей на рис. 1 показывает, что увеличение размеров пор приводит к повышению прогрева КТЗП при заданном значении величины ТП.

Причиной этого повышения, является изменение соотношения между радиационной  $\lambda_R$  и молекулярной  $\lambda_g$  составляющими коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\Sigma}$ . Увеличение размеров пор приводит к возрастанию вклада излучения в долю переноса тепла вглубь теплозащитного покрытия.

**Выводы.** Представлена модель теплового разрушения КТЗП с учетом модели пористого тела. Получена оценка влияния геометрических размеров пор на прогрев материала покрытия при заданных величинах тепловых потоков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. Под ред. А.В. Лыкова. – М. : Энергия, 1976. – 392 с.
2. Хастингс Д.Е. Внутреннее испарение пористых материалов при лазерном облучении / Д.Е. Хастингс, А.А. Ригос / Аэрокосмическая техника. – № 5, 1989. – С. 139-144.
3. Дуреев В.А. Модель стационарного поверхностного разрушения композиционного покрытия с учетом коэффициента отражения излучения / Проблемы пожарной безопасности: Сб. научн. тр. Вып. 37. – Х.: НУГЗУ, 2015. – С. 62-65 – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Ppb\\_2015\\_37\\_13.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Ppb_2015_37_13.pdf).
4. Алифанов О. М. Определение коэффициента внутреннего теплообмена и эффективной теплопроводности пористого тела по данным нестационарного эксперимента / О.М. Алифанов, А.П. Тренин / Инженерно-физический журнал, 1985. – Т. 48. – № 3 – С. 472-483.

*Получено редколлегией 11.10.2017*

В.О. Дуреев

### **Облік моделі пористого тіла в поверхневому руйнуванні композиційного покриття**

Проведена оцінка впливу моделі пористого тіла на прогрів композиційного теплозахисного покриття. Запропоновано спосіб визначення температурного поля з урахуванням геометричних розмірів пор.

**Ключові слова:** стаціонарне поверхнєве руйнування композиційного теплозахисного покриття, пористість, параметр пористості.

V. Dureev

### **The accounting model for a porous body in a surface destruction composite coatings**

The influence model of porous body to warm up of composition-tional thermal barrier coating. The proposed method of determining the temperature field taking into account the geometric size of the pores.

**Keywords:** stationary surface destruction of composite heat insulation coating, paint-employment, porosity parameter.