

УДК 621.454.2

А.В. КОРЕЛЬСКИЙ, В.Л. ДЖЕППА, В.М. ДУРАЧЕНКО

Государственное предприятие КБ "Южное" им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА РАБОЧЕГО ТЕЛА В АММИАЧНОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Описана методика расчета нагрева рабочего тела (аммиака) в пористом нагревателе. По заданным входным условиям (давлению, температуре и расходу аммиака) рассчитывается установившийся (стационарный) процесс нагрева аммиака и продуктов его разложения. В качестве выходных параметров берутся распределение термодинамических величин нагреваемой смеси по объему пористого нагревателя. Согласно данной методике написан программный код, по которому произведен расчет для некоторых случаев конструкции аммиачного двигателя. Представлена методика расчета равновесного состава аммиачной смеси.

**Ключевые слова:** аммиачная двигательная установка, пористый нагреватель, равновесная аммиачная смесь, термодинамические параметры смеси.

### Введение

Непосредственно перед истечением из сопла в электронагревных двигателях (ЭНД) аммиачных двигательных установок (АДУ) космических аппаратов рабочее тело – аммиак – проходит стадии нагрева и, соответственно, термического разложения для достижения необходимых тяговых характеристик. В конструкциях таких двигателей для нагрева аммиака наиболее эффективно пропускать его через пористое тело, к которому тем или иным способом подведена тепловая мощность. В процессе создания таких двигателей возникает необходимость в предварительной отработке процесса нагрева рабочего тела и расчета расходных, термодинамических, энергетических и других параметров системы нагрева. В данной работе описана методика расчета нагрева аммиака в пористом нагревателе ЭНД, математическая модель и ее представление в конечных разностях. Для непосредственного расчета написана программа на языке программирования C++.

Опишем общую концепцию поставленной задачи. В качестве пористого нагревательного элемента возьмем карбид кремния. Положим, что все его тепловые и электрические характеристики не зависят от температуры и изотропны. Потери тепла на излучение при расчете баланса энергии учитывать не будем.

Для аммиачной смеси введем следующие упрощения:

- смесь является идеальным газом, подчиняющимся уравнению Менделеева-Клапейрона;
- теплопроводностью газа вдоль его движения можно пренебречь;

– химическое равновесие в смеси устанавливается мгновенно;

– состав смеси зависит только от температуры и давления;

– компонентами смеси являются только аммиак, молекулярный водород и молекулярный азот.

Реакция синтеза и разложения аммиака многостадийна с образованием нескольких промежуточных активированных комплексов [1], обладающих разными константами скоростей. Однако, как и в большинстве случаев, для общих скоростей прямой и обратной реакций с большой степенью точности справедливы уравнения (1), (3) для скоростей и констант скоростей реакций без учета промежуточных стадий [2].

## 1. Методика расчета

### 1.1. Расчет состава аммиачной смеси

Одним из необходимых пунктов решения задачи нагрева аммиака в ЭНД АДУ является расчет состава смеси ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) при заданных термодинамических условиях – температуре и давлении. На основе этих данных вычисляются необходимые для теплового расчета параметры газа: энтальпия, теплоемкость, теплопроводность, вязкость, плотность.

Соотношение равновесных концентраций реакции разложения – синтеза аммиака определяется константой равновесия [2 – 4]:

$$K_{\text{равн.}} = \frac{[\text{N}_2]^{\frac{1}{2}} [\text{H}_2]^{\frac{3}{2}}}{[\text{NH}_3]}, \quad (1)$$

где  $[NH_3]$ ,  $[N_2]$ ,  $[H_2]$  – мольные концентрации аммиака, азота и водорода соответственно.

Константу равновесия можно, в некотором приближении, представить в виде [3]:

$$K_{\text{равн.}} = C_0 e^{-\frac{H_0^f}{RT}}, \quad (2)$$

где  $H_0^f$  – стандартная энтальпия образования;  $C_0$  – постоянный множитель;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура (К).

Множитель  $C_0$  проще всего рассчитать исходя из экспериментальных данных состава реакционной аммиачной смеси [5,6] при известной температуре, согласно этим расчетам:  $C_0 \sim 5,4 \cdot 10^6$  моль/м<sup>3</sup>. Представим мольную концентрацию аммиака в смеси в виде:  $[NH_3] = [M_0] - [X]$  ( $[X]$  – концентрация разложившегося аммиака,  $[M_0]$  – концентрация аммиака до реакции). Тогда согласно стехиометрическим коэффициентам:

$$C_0 e^{-\frac{H_0^f}{RT}} = \frac{\left(\frac{1}{2}[X]\right)^2 \left(\frac{3}{2}[X]\right)^2}{[M_0] - [X]}, \quad (3)$$

Дополним уравнение (3) уравнением состояния идеального газа:

$$[M_0] - [X] = \frac{P}{RT}, \quad (4)$$

где  $P$  – давление смеси.

Решая систему уравнений (3), (4), получим значение  $[X]$  и, следовательно, концентрации составляющих смесь компонентов. Зная состав смеси можно рассчитать необходимые термодинамические параметры.

### 1.2. Расчет стационарного течения аммиака в пористом цилиндрическом нагревателе

Для характеристики пористого нагревателя используем следующие постоянные:  $\chi$  – вязкостный коэффициент пористости и  $\alpha$  – пористость,

$$\alpha = V_{\text{пор}}/V_0,$$

$V_{\text{пор}}$  – объем пор,  $V_0$  – полный объем.

Из этих параметров можно вывести необходимые для расчета величины, такие как: эффективный диаметр пор  $\delta$ , плотность свободной поверхности  $\sigma$ , толщину стенки пор  $\delta_s$ :

$$\delta \sim \sqrt{\frac{1}{\chi}}, \sigma = \frac{\alpha}{\delta}, \delta_s = (1 - \alpha) / \sigma. \quad (5)$$

Для стационарного процесса нагрева аммиака в пористом нагревателе справедливы следующие уравнения:

$$\frac{\lambda_s}{c_s \rho_s} \Delta T_s + \omega - \frac{\lambda}{c_s \rho_s \delta_s} \left( \frac{dT}{dn} \right) = 0; \quad (6)$$

$$\oint \lambda \left( \frac{dT}{dn} \right) ds = dH \dot{m}; \quad (7)$$

$$\nabla P = \chi \eta v, \quad (8)$$

где  $\lambda_s, c_s, \rho_s$  – теплопроводность, теплоемкость и плотность нагревателя;  $\lambda$  – теплопроводность газовой смеси;  $T, T_s$  – температура смеси и нагревателя;  $\omega$  – объемная плотность тепловой мощности;  $n$  – нормаль к поверхности стенки поры;  $ds$  – элементарная площадка на поверхности стенки поры;  $dH$  – изменение энтальпии смеси;  $\dot{m}$  – массовый расход;  $\nabla P$  – градиент давления;  $\eta$  – вязкость;  $v$  – скорость потока.

Уравнение (6) является стационарным уравнением теплопроводности, последнее слагаемое характеризует отвод тепла от стенки поры к аммиачной смеси, протекающей через пору. Уравнение (7) описывает изменение энтальпии газа при протекании через “кольцо”, образованное стенкой поры, интеграл берется по всей поверхности “кольца”. Выражение (8) – дифференциальная форма закона Дарси.

Записав уравнения (6) – (8) в виде конечных разностей, получим систему нелинейных уравнений, которую можно решить, например, методом последовательных приближений Ньютона.

## 2. Результаты расчета

Для проведения расчета использовались следующие данные:

$$- T_{\text{вх.}} = 300 \text{ К}; T_{\text{вых.}} = 1373 \text{ К};$$

$$- P_{\text{вх.}} = 301800 \text{ Па};$$

$$- \dot{m} = 0,0000192 \text{ кг/с};$$

$$- R_1 \text{ (внутренний радиус нагревателя)} = 0,005 \text{ м};$$

$$- R_2 \text{ (внешний радиус нагревателя)} = 0,01 \text{ м};$$

$$- L \text{ (длина нагревателя)} = 0,04 \text{ м}.$$

Характеристики материала нагревателя:

$$- \chi = 1,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2};$$

$$- c_s = 670 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$$

$$- \lambda_s = 190 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$- \rho_s = 3100 \text{ кг/м}^3;$$

$$- \alpha = 0,02.$$

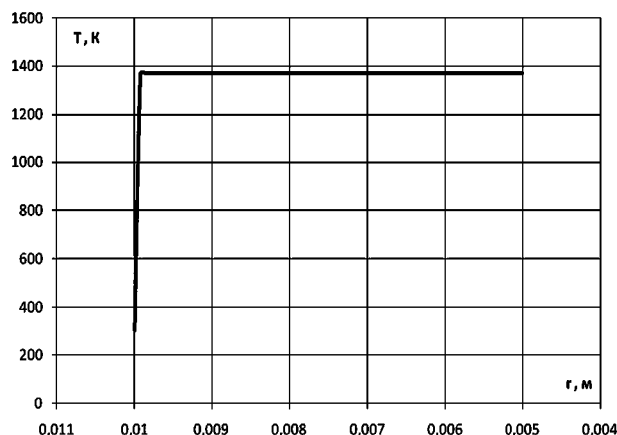
Мощность нагревателя подбиралась так, чтобы выходная температура газа  $T_{\text{вых.}} \approx 1373 \text{ К}$ .

Найденная таким образом величина:  $W = 124 \text{ Вт}$ .

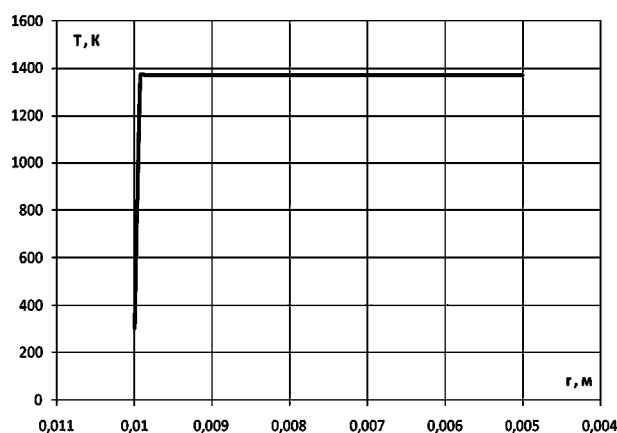
Результат расчета представлен на рис. 1 в виде распределения температуры и давления по радиус-вектору от оси цилиндрического нагревателя.

Температура пористого нагревателя остается практически постоянной по всему своему объему, что объясняется высокой теплопроводностью материала нагревателя по сравнению с газовой. Темпе-

ратура смеси при этом резко растет на малом “пути”  $\delta r_{\text{heat}}$ , после чего остается практически постоянной и близкой к температуре нагревателя. Оценка параметра  $\delta r_{\text{heat}}$  дает значение менее  $10^{-7}$  м, а оценка  $\delta \sim 10^{-7}$  м.



а



б

Рис. 1. Распределение температуры (а) и давления аммиачной смеси (б) Эв пористом нагревателе,  $r$  – расстояние до оси нагревателя

При значении пористости  $\alpha = 0,2$  и вязкостного коэффициента пористости  $\chi = 1,2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ , эффективный диаметр пор  $\delta = 0,23 \cdot 10^{-3}$  м. Распределение температур смеси газов и материала, для этого случая, показаны на рис. 2.

### Заключение

Приведенная методика расчета стационарного течения аммиачной смеси через пористый нагреватель и написанный на ее основе программный код позволяет оперативно рассчитывать параметры ра-

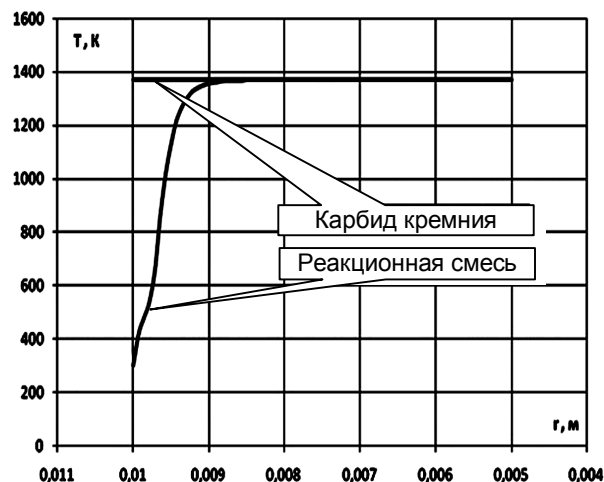


Рис. 2. Зависимость температуры газовой реакционной смеси аммиака и нагревателя (карбида кремния) от расстояния до его оси при  $\chi = 1,2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$

бочего тела на входе в сопло двигательной установки. Проверочные расчеты показали, что, в большинстве практически применяемых конструкций нагревателей, аммиак полностью разлагается в тонком цилиндрическом слое пористого нагревателя.

Представленная методика при незначительных изменениях может быть использована для расчета нагревателей аммиачных двигателей иной конструкции, например, в виде пакета параллельных или винтовых каналов и подводе тепла с наружной или внутренней поверхности пакета.

### Литература

1. Turanyi T. Reaction-rate analysis of complex kinetic systems / T. Turanyi, T. Berces, S. Vajda // *Int. J. Chem. Kinet.* 1989.
2. Эмануэль Н.М. Курс химической кинетики : учебник для хим. фак. ун-тов / Н.М. Эмануэль, Д.Г. Кнорре. – М.: Высш. шк., 1984. – 463 с.
3. Кубасов А.А. Химическая кинетика и катализ : уч. мат. по физ. хим. / А.А. Кубасов. – М. : Изд-во Московского университета, 2004.
4. Мюестер Л. Химическая термодинамика : уч. пос. / Л. Мюестер. – М.: Издательство мир, 1971.
5. Cooper D.A. Decomposition of  $\text{NH}_3$  over Quartz Sand at 840-960° C / D.A. Cooper, E.B. Ljungstrom. – *Energy & Fuels*, 1988.
6. Гоникберг М.Г. Химическое равновесие и скорость реакций при высоких давлениях: монография / М.Г. Гоникберг. – М.: Издательство академии наук СССР, 1960. – 272 с.

Поступила в редакцию 23.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, начальник сектора В.С. Хорошилов, Государственное предприятие КБ "Южное" им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ РАБОЧОГО ТІЛА В АМІАЧНОМУ РАКЕТНОМУ ДВИГУНІ

*А.В. Корельський, В.Л. Джеппа, В.М. Дураченко*

Описано методику розрахунку нагрівання робочого тіла (аміаку) у пористому нагрівнику. За заданими вхідними умовами (тиском, температурою та витратою аміаку) розраховується сталий (стаціонарний) процес нагрівання аміаку та продуктів його розкладання. Як вихідні параметри беруть розподіл термодинамічних величин суміші, яка нагрівається, за об'ємом пористого нагрівника. Згідно даної методики утворено програмний код, за яким наведено розрахунок для деяких варіантів конструкції аміачного двигуна. Подано методику розрахунку рівноважного складу аміачної суміші.

**Ключові слова:** аміачний двигун, пористий нагрівник, рівноважна аміачна суміш, термодинамічні величини аміачної суміші.

### PROPULSIVE MASS HEATING PROCESS SIMULATION OF AMMONIA JET ENGINE

*A.V. Korel'sky, V.L. Jeppa, V.M. Durachenko*

The propulsive mass (ammonia) heating process design procedure is described. By input conditions (pressure, temperature and flow rate of ammonia) the steady (stationary) heating process of ammonia and products of its decomposition is calculated. In the capacity of output result it is using distribution of ammonia mix thermodynamic parameters by volume of porous heater. It is calculated some case of ammonia engine by using program code created according to described method. The computational method of ammonia mix equilibrium composition is presented.

**Key words:** ammonia jet engine, porous heater, balanced mix of ammonia, thermodynamic properties of ammonia mix.

**Корельський Алексей Викторович** – канд. физ-мат. наук, ведущий инженер, Государственное предприятие КБ "Южное" им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина, e-mail: alexkrl@mail.ru.

**Джеппа Валентин Лукич** – начальник группы, Государственное предприятие КБ "Южное" им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

**Дураченко Владимир Михайлович** – начальник отдела, Государственное предприятие КБ "Южное" им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.