

УДК 629.7.036.22

Загребельная Л.И., Кобец Е.В., Часовский А.С.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕАКТИВНЫХ ГОРЕЛОК  
ДЛЯ РАЗМОРАЖИВАНИЯ СМЕРЗШИХСЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Для решения проблемы смерзания транспортируемых сыпучих материалов в зимний период времени на железнодорожном транспорте проводится большой комплекс исследовательских работ. Однако имеющиеся способы борьбы со смерзанием грузов и зачисткой вагонов не всегда эффективны и дешевы, что вызывает необходимость поиска новых способов – использования реактивных горелок для огневого оттаивания смерзшихся сыпучих грузов.

Рабочим органом инструмента является высокотемпературная сверхзвуковая струя, которая практически не находится в контакте со смерзшимся материалом на стенках и днище вагона.

Реактивная горелка должна работать в широком диапазоне изменения температуры и скорости истечения газа ввиду того, что необходимо вести размораживание различных типов сыпучих грузов (уголь, гравий, железная руда, гранулированный шлак, песок и другие материалы), глубина промерзания которых 200–300 мм [1].

Для определения термодинамических свойств газовой струи и параметров газа в камере сгорания, необходимых для расчета геометрических размеров и выбора оптимальных режимов работы реактивной горелки, нужно сделать термодинамический расчет процессов в реактивной горелке, работающей на газообразном топливе и сжатом воздухе [2].

Рассматриваемый ниже метод рекомендуется для термодинамического расчета параметров газа реактивных горелок (рис. 1), работающих на воздухе и топливе, содержащем углерод, водород, серу, кислород и азот.

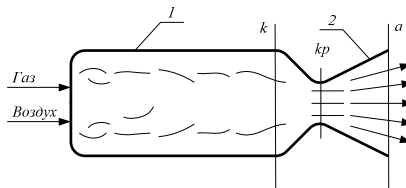


Рисунок 1 – Принципиальная схема реактивной горелки:  
1 – камера сгорания; 2 – реактивное сопло; k, kp, a – характерные сечения

Пользуясь зависимостью для определения числа атомов элемента в условной формуле вещества

$$x = \sum_{(i)} r_i x_i ,$$

где  $r_i$  – объемная доля  $i$ -го вещества;  $x_i$  – число атомов данного элемента в  $i$ -м веществе, получим условные формулы горючего  $C_{c_r} H_{h_r} S_{s_r} O_{o_r} N_{n_r}$  и воздуха  $O_{o_o} N_{n_o}$ .

Число атомов соответствующих элементов в условной формуле топлива  $C_{c_r} H_{h_r} S_{s_r} O_{o_r} N_{n_r}$  определяем из равенств:

$$\begin{aligned} c_T &= c_r, \quad h_T = h_r, \\ o_T &= o_r + \alpha_T \nu_o o_o, \\ s_T &= s_r, \\ n_T &= n_r + \alpha_T \nu_o n_o, \end{aligned}$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха;  $\nu_o$  – теоретически необходимое количество воздуха, кг моль воздуха / кг моль топлива, определяемое из равенства

$$\nu_o = \frac{2c_r + \frac{h_r}{2} + 2s_r}{o_o} .$$

Проведенные нами исследования показали, что температура сгорания  $T_k$  газообразных веществ в атмосфере сжатого воздуха в камере сгорания горелки при стехиометрическом соотношении топливных компонентов не превышает 2300–2400 К. При таких значениях температуры степень диссоциации продуктов сгорания невелика и ею можно пренебречь. В этом случае в состав продуктов сгорания помимо основных продуктов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{N}_2$  при недостатке воздуха ( $\alpha_T < 1$ ) входят продукты реакции водяного газа  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , а при избытке воздуха ( $\alpha_T > 1$ ) – свободный кислород  $\text{O}_2$ . Это определяет некоторые особенности термодинамического расчета.

Термодинамический расчет при  $\alpha_T < 1$ .

Пользуясь законами химического равновесия, сохранения материи и энергии и законом Дальтона, получим систему уравнений:

а) уравнения для определения парциальных давлений газов, входящих в состав продуктов сгорания:

$$p_{\text{CO}} = c_T M_T - p_{\text{CO}_2}; \quad (1)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = M_T (o_T - c_T - 2s_T) p_{\text{CO}_2}; \quad (2)$$

$$p_{\text{H}_2} = M_T \left( \frac{H_T}{2} - o_T + 2s_T \right) + p_{\text{CO}_2}; \quad (3)$$

$$p_{\text{N}_2} = \frac{N_T}{2} M_T; \quad (4)$$

$$p_{\text{SO}_2} = s_T M_T; \quad (5)$$

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} p_{\text{CO}}}{K_{2a} p_{\text{H}_2}}, \quad (6)$$

где  $K_{2a}$  – константа химического равновесия реакции водяного газа;  $M_T$  – число молей горючей смеси, при сгорании которого обеспечивается заданное давление в камере сгорания ( $p_k = p_\Sigma$ ) или на срезе сопла ( $p_a = p_\Sigma$ ), определяемое из равенства

$$M_T = \frac{2p_\Sigma}{2c_T + H_T + N_T + 2s_T}; \quad (7)$$

б) уравнение закона Дальтона

$$\sum_{i=1}^6 p_i = p_\Sigma; \quad (8)$$

в) уравнение постоянства энтальпии в камере сгорания перед соплом, ккал/кг·моль топлива:

$$H_{\mu_{\text{пр.ср}}(T_k p_k)} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^6 p_i H_{\mu_i} \right]_{(T_k p_k)}}{M_{T_k}} = H_{\mu_T}, \quad (9)$$

где  $H_{\mu_i}$  – энтальпия  $i$ -го продукта сгорания;  $H_{\mu_T}$  – энтальпия моля топлива  $H_{\mu_T} = H_{\mu_f} + \alpha_T \nu_o H_{\mu_o}$ , здесь  $H_{\mu_f}$  и  $H_{\mu_o}$  – энтальпия топлива и окислителя;

г) уравнение закона сохранения энергии для камеры и среза сопла

$$\left[ \sum_{i=1}^6 p_i H_{\mu_i} \right]_{(T_k p_k)} = \left[ \sum_{i=1}^6 p_i H_{\mu_i} \right]_{(T_a p_a)} + A \frac{W_a^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $W_a$  – скорость истечения газа из сопла;

д) уравнение постоянства энтропии при расширении газа в сопле

$$\left[ \frac{\sum_{i=1}^6 p_i \left( S_{O_i} - 4,571g \frac{P_i}{P_o} \right)}{M_{T_k}} \right]_{(T_k P_k)} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^6 p_i \left( S_{O_i} - 4,571g \frac{P_i}{P_o} \right)}{M_{T_a}} \right]_{(T_a P_a)} \quad (11)$$

В эту систему уравнений входят шесть парциальных давлений газов  $p_i$ , температура газа внутри камеры сгорания  $T_k$  и на срезе сопла  $T_a$ , число молей смеси газов  $M_T$  и скорость истечения газов из сопла  $W_a$ .

*Определение параметров газа в камере сгорания.* Из равенства (7) находим число молей смеси газов  $M_{T_k}$ .

Задаемся тремя значениями температуры  $T_1, T_2, T_3$ , в интервале которых должна находиться искомая температура  $T_k$ . Для этих температур находим значения констант химического равновесия реакции водяного газа и, пользуясь равенствами (1)–(6), определяем парциальные давления газов.

Определяем полную энтальпию продуктов сгорания из равенства (9) и строим вспомогательный график  $H_{\mu_{np.cr}(T_k P_k)} = f(T)$ .

В силу равенства (9) по графику рис. 2 а определяем искомую температуру  $T_k$  и по ней из равенств (1)–(6) находим истинные парциальные давления газов  $p_{i_k}$ .

Расчет считается окончанным, если выдерживается равенство (8).

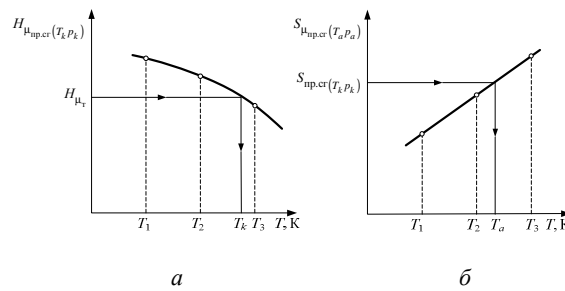


Рисунок 2 – Графики для определения температур  $T_k$  и  $T_a$ :  
а – температура в камере сгорания  $T_k$ ; б – температура на срезе сопла  $T_a$

*Определение параметров газа на срезе сопла.* Поскольку состав газа в сопле не меняется, парциальные давления газов на срезе сопла определяем из условия

$$p_{i_a} = p_{i_k} \frac{P_a}{P_k}, \quad (12)$$

где  $p_k$  и  $p_a$  – заданное давление в камере сгорания и на срезе сопла;  $p_{i_k}$  – истинное парциальное давление  $i$ -го газа в камере сгорания.

Аналогичная закономерность сохраняется и при определении числа молей топлива

$$M_{T_a} = M_{T_k} \frac{P_a}{P_k}. \quad (13)$$

Задаемся тремя значениями температур газа на срезе сопла  $T$ , в интервале которых должна находиться искомая температура. По заданным температурам определяем энтропию продуктов сгорания, относенную к молю топлива:

$$S_{\mu_{np.cr}(T_a P_a)} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \left( S_{O_i} - 4,571g \frac{P_i}{P_a} \right)}{M_{T_a}} = f(T). \quad (14)$$

По этим данным строим график  $S_{\text{пр.ст}}(T_a, p_a) = f(T)$  (рис. 2б) и с помощью его из условия (11) находим искомую температуру  $T_a$ .

Скорость истечения газа из сопла определяем из условия (10).

При  $\alpha_T \leq 1$  система расчетных уравнений состоит из уравнений (8)–(14) и уравнений для определения парциальных давлений газов, входящих в состав продуктов сгорания:

$$p_{\text{CO}_2} = c_T M_T; \quad (15)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H_T}{2} M_T; \quad (16)$$

$$p_{\text{O}_2} = \left( \frac{O_T}{2} - c_T - \frac{H_T}{4} - s_T \right) M_T; \quad (17)$$

$$p_{\text{N}_2} = \frac{H_T}{2} M_T; \quad (18)$$

$$p_{\text{SO}_2} = s_T M_T, \quad (19)$$

где

$$M_T = \frac{4p_\Sigma}{2O_T + H_T + 2H_T}. \quad (20)$$

Схема решения здесь аналогична случаю  $\alpha_T < 1$ . Исключение состоит в том, что число молей смеси газов  $M_T$  определяется из уравнения (20), парциальные давления газов – из равенств (15)–(19). Пункт «б» схемы расчета при определении параметров газа в камере сгорания исключается.

**Выводы.** Максимальное значение температуры сгорания, а также температуры и скорости газа на срезе сопла соответствуют значению коэффициента избытка окислителя  $\alpha_T = 1$ . Отклонение коэффициента избытка окислителя от значения  $\alpha_T = 1$  ведет к снижению параметров газа и увеличению относительного расхода топлива. Повышение давления в камере сгорания приводит к увеличению скорости истечения и снижению температуры газа на выходе из сопла.

#### Литература

1. Zagrebelnaj L.I. Reactive burner as power source in the technological processes of hard rock dislocation / L.I. Zagrebelnaj // Annals of University of Petrosani-Romania. Mechanical Engineering. – 2002. – vol 1.
2. Загребельна Л.І. Джерело енергії для руйнування мінеральних середовищ / Л.І. Загребельна, О.В. Кобець // «Інтегровані технології та збереження». – 2011. – №1. – С. 10–13.

#### Bibliography (transliterated)

1. Zagrebelnaj L.I. Reactive burner as power source in the technological processes of hard rock dislocation L.I. Zagrebelnaj Annals of University of Petrosani-Romania. Mechanical Engineering. – 2002. – vol 1.
2. Zagrebel'na L.I. Dzherelo energii dlja rujnuvannja mineral'nih seredovishh L.I. Zagrebel'na, O.V. Kobec' «Integrovani tehnologii ta zberezhenja». – 2011. – #1. – p. 10–13.

УДК 629.7.036.22

Загребельна Л.І., Кобець О.В., Часовський О.С.

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕАКТИВНИХ ПАЛЬНИКІВ ДЛЯ РОЗМОРОЖУВАННЯ СМЕРЗШИХСЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається використання реактивного пального для проблеми зачистки вагонів залізничного транспорту від смерзшихся вантажів.

Zagrebelnaj L.I., Kobets E.V., Chasovski A.S.

**THE POSSIBILITY RESEARCH OF USING REACTIVE BURNERS  
TO CLEAN GRANULAR MATERIALS IS CONSIDERED**

The use of reactive burners for cleaning of railway wagons from frozen cargo is considered.