

Н.К. ЮРКОВ, Р.А. ШТЫКОВ

**Расчет круглой турбулентной струи  
природного и сжиженного газов с  
диффузионным факелом**

УДК 681.324

Муромский институт  
(филиал) ФГБОУ ВО  
«Владимирский  
государственный  
университет имени  
А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
г. Муром

*В статье рассматриваются способы решения диффузионной задачи, которые доказаны суммированием концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя и стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени.*

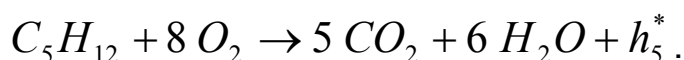
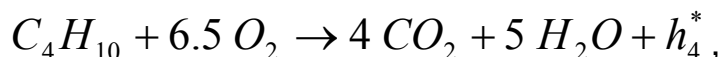
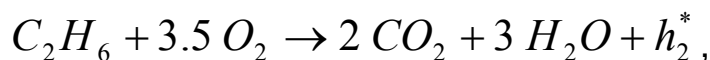
Природный газ имеет в своем составе ряд компонентов: метан, этан, пропан, азот и другие. В составе добываемого из различных месторождений в разное время природного газа эти компоненты имеют различные концентрации. С изменением состава горючего характеристики его меняются, что и влияет на процессы тепло- и массообмена при истечении горючего из круглого сопла с радиусом  $a$  и распространении его в затопленном воздухом пространстве при наличии диффузионного фронта пламени.

При умеренных скоростях процесс описывается уравнениями теории турбулентного пограничного слоя многокомпонентного газа, с соответствующими граничными условиями [1] с той разницей, что способ приведения  $N$  уравнений сохранения количества  $i$ -го компонента к одному уравнению еще не известен, а для температуры имеем

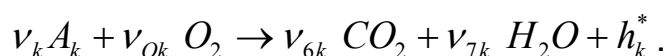
$$\bar{T} = \frac{\bar{C}_{p1}}{\bar{C}_p} \left( \bar{H}(\bar{H}_2 - 1) + 1 - \sum_{i=1}^5 C_i h_i^* \right).$$

Горючее в своем составе имеет горючие компоненты метана (1), этана (2), пропана (3), бутана (4) и пентана (5); кроме этих компонентов в движении участвуют молекулы кислорода (0), углекислого газа (6), водяного пара (7) и азота (8).

Реакции горения протекают согласно формулам:



которые можно написать в общем виде при  $k = 1, 2, 3, 4, 5$ :



Начальная концентрация кислорода  $\langle C_O \rangle_1$  распределяется между горючими  $A_i$  так, что  $\langle C_{Oi} \rangle_1$  часть кислорода (весовая концентрация по всей массе) вступает в реакцию только с  $i$ -м компонентом горючего. Тогда

$$\langle C_O \rangle_1 = \sum_{i=1}^5 \langle C_{Oi} \rangle_1. \quad (1)$$

Для каждого горючего компонента вводится консервативная функция  $\tilde{C}_i$ , местоположение фронта пламени  $i$ -го горючего определяется из условия

$$\tilde{C}_i = \tilde{C}_i^*,$$

где

$$\tilde{C}_i^* = \frac{v_i m_i \langle C_{Oi} \rangle_1}{v_i m_i \langle C_{Oi} \rangle_1 + v_{Oi} m_O \langle C_i \rangle_2}$$

при  $i = 1, 2, 3, 4$  и  $5$ .

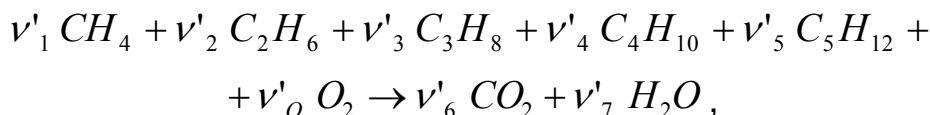
На основе гипотезы наличия единого фронта пламени имеем

$$\begin{aligned} \frac{v_{O1} m_O \langle C_1 \rangle_2}{v_1 m_1 \langle C_{O1} \rangle_1} &= \frac{v_{O2} m_O \langle C_2 \rangle_2}{v_2 m_2 \langle C_{O2} \rangle_1} = \frac{v_{O3} m_O \langle C_3 \rangle_2}{v_3 m_3 \langle C_{O3} \rangle_1} = \\ &= \frac{v_{O4} m_O \langle C_4 \rangle_2}{v_4 m_4 \langle C_{O4} \rangle_1} = \frac{v_{O5} m_O \langle C_5 \rangle_2}{v_5 m_5 \langle C_{O5} \rangle_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решив совместно уравнения (1) и (2), получим

$$\tilde{C}_i^* = \frac{v_{O_i} \langle C_O \rangle_1 \langle C_i \rangle_2}{v_i m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k} \langle C_k \rangle_2}{v_k m_k}}, \quad i=1, 2, 3, 4, 5$$

и составим единое стехиометрическое уравнение



где

$$v'_0 = 1, \quad v'_1 = \frac{\langle C_{O1} \rangle_1}{2.0 \langle C_O \rangle_1}, \quad v'_2 = \frac{\langle C_{O2} \rangle_1}{3.5 \langle C_O \rangle_1},$$

$$v'_3 = \frac{\langle C_{O3} \rangle_1}{5.0 \langle C_O \rangle_1}, \quad v'_4 = \frac{\langle C_{O4} \rangle_1}{6.5 \langle C_O \rangle_1}, \quad v'_5 = \frac{\langle C_{O5} \rangle_1}{8.0 \langle C_O \rangle_1},$$

$$v'_6 = v'_1 + 2v'_2 + 3v'_3 + 4v'_4 + 5v'_5, \quad v'_7 = 2v'_1 + 3v'_2 + 4v'_3 + 5v'_4 + 6v'_5.$$

Для рассматриваемых реагентов имеют место соотношения

$$\omega_7 v'_i m_i \pm \omega_i v'_7 m_7 = 0, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6,$$

где массовые скорости  $\omega_i$  при  $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$  принимают не положительные значения, а при  $i=6, 7$  - не отрицательные.

Вместо  $C_i$  вводятся функции  $\tilde{C}_i$  и  $\tilde{\tilde{C}}_i$  в виде

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} C'_7 v'_i m_i + C_i v'_7 m_7, & i=0, 1, 2, 3, 4, 5, \\ C'_7 v'_i m_i - C_i v'_7 m_7, & i=6; \end{cases} \quad (3)$$

и уравнения принимают единый и взаимно эквивалентный вид.

Сопоставив (1) и (3), получим семь линейных уравнений относительно восьми неизвестных значений концентраций  $C_i$ . Из этих уравнений определим значение концентраций компонентов:

при  $1 > \tilde{C}_i > \tilde{C}^*$  отсутствует кислород, т.е.  $C_O=0$ . Тогда решая систему из семи линейных уравнений, найдем

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \left( \langle C_i \rangle_2 + \langle C_{O_i} \rangle_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_O} \right) \tilde{C} - \langle C_{O_i} \rangle_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_O}, & i=1 \dots 5 \\ \left( \langle C_i \rangle_1 + \frac{m_i}{m} \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k}}{v_{O_k}} \langle C_{O_k} \rangle_1 \right) (1 - \tilde{C}) - \langle C_i \rangle_2 \tilde{C}, & i=6-7. \end{cases} \quad (4)$$

Таким же образом можно получить, при  $\tilde{C}^* > \tilde{C} \geq 0$  отсутствуют горючие компоненты, т.е.  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 0$  и

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \langle C_O \rangle_1 - \left( \langle C_O \rangle_1 + m_O \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok}}{v_k m_k} \langle C_k \rangle_2 \right) \tilde{C}, & i=0 \\ \langle C_i \rangle_1 + \left( \langle C_i \rangle_2 - \langle C_i \rangle_1 m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{ik}}{v_{Ok} m_k} \langle C_k \rangle_2 \right) \tilde{C}, & i=6-7, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\tilde{C}^* = \left( 1 + \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok} m_O \langle C_k \rangle_2}{v_k m_k \langle C_O \rangle_1} \right)^{-1}.$$

На основе второй части уравнения определим концентрацию молекулярного азота

$$C_8 = \langle C_8 \rangle_1 + (\langle C_8 \rangle_2 - \langle C_8 \rangle_1) \tilde{C}.$$

После введения консервативной функции  $\tilde{C}$  и определения концентраций (3)-(5), которые решаются при

$$\begin{aligned} T_1 &= 300 \text{ K}, & T_2 &= 500 \text{ K}, & \langle C_O \rangle_1 &= 0.232 \text{ кг / кг}, \\ \langle C_8 \rangle_1 &= 0.768 \text{ кг / кг}, & h_1^* &= 11985 \text{ ккал / кг}, & h_2^* &= 11375 \text{ ккал / кг}, \\ h_3^* &= 11102 \text{ ккал / кг}, & h_4^* &= 10950 \text{ ккал / кг}, & h_5^* &= 11091 \text{ ккал / кг}, \\ h_0^* &= h_6^* = h_7^* = h_8^* = 0 \text{ ккал / кг}. \end{aligned}$$

При решении задач диффузионного горения газа в воздухе вместо природного газа можно принимать горючую смесь, состоящую из метана или из смеси метана с азотом, т.е. только с одним горючим компонентом, что намного упрощает решение задачи.

Заметим, что возможности продемонстрированы в данной статье для случая струйных течений в двухмерной постановке. Но модель можно применять для более общих случаев, если не учесть увеличение количества операций в расчетах, связанных с определением концентраций каждого из компонентов.

## Литература

1. Штыков Р.А. Измененная модель диффузионного горения многокомпонентного горючего газа / Р.А. Штыков // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2015. - № 3. - С. 93-97.

E-MAIL: IPMRROMAN@YANDEX.RU