

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ КРУГЛОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИРОДНОГО И СЖИЖЕННОГО ГАЗОВ В ДИФФУЗИОННОМ ФАКЕЛЕ

Р. А. Штыков

Введение

Природный газ имеет в своем составе ряд компонентов: метан, этан, пропан, азот и др. 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.

Постановка задачи

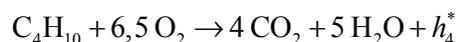
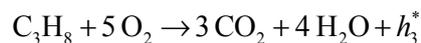
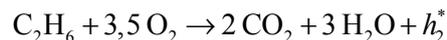
При умеренных скоростях процесс описывается уравнениями теории турбулентного пограничного слоя многокомпонентного газа с соответствующими граничными условиями с той разницей, что способ приведения N уравнений сохранения количества i -го компонента к одному уравнению еще не известен, а для температуры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

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

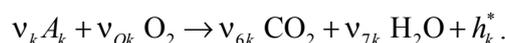
Горючее в своем составе имеет горючие компоненты метана, этана, пропана, бутана и пентана; кроме этих компонентов, в движении участвуют молекулы кислорода, углекислого газа, водяного пара и азота.

Построение модели

Реакции горения протекают согласно формулам



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



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

$$\langle C_{\text{O}} \rangle_1 = \sum_{i=1}^5 \langle C_{\text{O}_i} \rangle_1. \quad (1)$$

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

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

где $\bar{C}_i^* = \frac{v_i m_i < C_{O_i} >_1}{v_i m_i < C_{O_i} >_1 + v_{O_i} m_{O_0} < C_i >_2}$ при $i = 1, 2, 3, 4$ и 5 .

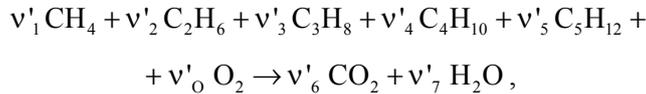
На основе гипотезы наличия единого фронта пламени имеем

$$\begin{aligned} \frac{v_{O_1} m_{O_0} < C_1 >_2}{v_1 m_1 < C_{O_1} >_1} &= \frac{v_{O_2} m_{O_0} < C_2 >_2}{v_2 m_2 < C_{O_2} >_1} = \frac{v_{O_3} m_{O_0} < C_3 >_2}{v_3 m_3 < C_{O_3} >_1} = \\ &= \frac{v_{O_4} m_{O_0} < C_4 >_2}{v_4 m_4 < C_{O_4} >_1} = \frac{v_{O_5} m_{O_0} < C_5 >_2}{v_5 m_5 < C_{O_5} >_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\bar{C}_i^* = \frac{v_{O_i} < C_{O_0} >_1 < C_i >_2}{v_i m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k} < C_k >_2}{v_k m_k}}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

и составим единое стехиометрическое уравнение



где

$$\begin{aligned} v'_0 = 1, \quad v'_1 = \frac{< C_{O_1} >_1}{2,0 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_2 = \frac{< C_{O_2} >_1}{3,5 < C_{O_0} >_1}, \\ v'_3 = \frac{< C_{O_3} >_1}{5,0 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_4 = \frac{< C_{O_4} >_1}{6,5 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_5 = \frac{< C_{O_5} >_1}{8,0 < C_{O_0} >_1}, \\ v'_6 = v'_1 + 2v'_2 + 3v'_3 + 4v'_4 + 5v'_5, \quad v'_7 = 2v'_1 + 3v'_2 + 4v'_3 + 5v'_4 + 6v'_5. \end{aligned}$$

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 ω_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 \bar{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 (2) и (3), получим семь линейных уравнений относительно восьми неизвестных значений концентраций C_i . Из этих уравнений определим значение концентраций компонентов:

при $1 > \tilde{C}_i > \bar{C}_i^*$ отсутствует кислород, т.е. $C_{O_0} = 0$. Тогда решая систему из семи линейных уравнений, найдем

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \left(< C_i >_2 + < C_{O_i} >_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_{O_0}} \right) \bar{C} - < C_{O_i} >_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_{O_0}}, & i = 1 \dots 5 \\ \left(< C_i >_1 + \frac{m_i}{m} \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k}}{v_{O_k}} < C_{O_k} >_1 \right) (1 - \bar{C}) - < C_i >_2 \bar{C}, & i = 6 - 7. \end{cases}$$

При $\bar{C}^* > \bar{C} \geq 0$ отсутствуют горючие компоненты, т.е. $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 0$ и

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} < C_{O_2} >_1 - \left(< C_{O_2} >_1 + m_O \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok}}{v_k m_k} < C_k >_2 \right) \bar{C}, & i=0 \\ < C_i >_1 + \left(< C_i >_2 - < C_i >_1 m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{ik}}{v_{Ok} m_k} < C_k >_2 \right) \bar{C}, & i=6-7, \end{cases}$$

где

$$\bar{C}^* = \left(1 + \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok} m_O < C_k >_2}{v_k m_k < C_{O_2} >_1} \right)^{-1}.$$

На основе второй части уравнения определим концентрацию молекулярного азота

$$C_8 = < C_8 >_1 + (< C_8 >_2 - < C_8 >_1) \bar{C}.$$

После введения консервативной функции \bar{C} и определения концентраций вернемся к основным уравнениям, которые решаются при

$$\begin{aligned} T_1 &= 300 \text{ K}, & T_2 &= 500 \text{ K}, & < C_{O_2} >_1 &= 0,232 \text{ кг/кг}, \\ < C_8 >_1 &= 0,768 \text{ кг/кг}, & h_1^* &= 11985 \text{ ккал/кг}, & h_2^* &= 11375 \text{ ккал/кг}, \\ h_3^* &= 11102 \text{ ккал/кг}, & h_4^* &= 10950 \text{ ккал/кг}, & h_5^* &= 11091 \text{ ккал/кг}, \\ h_0^* &= h_6^* = h_7^* = h_8^* &= 0 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

Составы горючего принимали согласно данным табл. 1.

Таблица 1

Массовые составы горючих газов $< C_i >_2$,
использованные для расчета круглого турбулентного факела

i	Компоненты	Составы					
		1	2	3	4	5	6
1	Метан	0,946	0,857	1	0,95	0,014	0
2	Этан	0,023	0,35	0	0,05	0,07	0,016
3	Пропан	0,005	0,04	0	0	0,427	0,964
4	Бутан	0,003	0,03	0	0	0,484	0,02
5	Пентан	0	0,004	0	0	0	0
6	Углекислый газ	0,001	0,021	0	0	0,005	0
7	Водяной пар	0	0	0	0	0	0
8	Молекулярный азот	0,22	0,013	0	0	0	0

Следует отметить, что пятый состав представляет собой сжиженный газ для теплого климата (в его составе преобладает более тяжелый компонент бутан), а шестой – для холодного климата.

Произведенные расчеты показывают, что для горючих составов 1–4 процессы тепло- и массообмена протекают почти одинаково: максимальная разница безразмерной скорости в соответствующих координатах составляет 0,005.

Кривые выгорания, определяемые с помощью формулы

$$I(x) = \int_0^{y+\infty} \left(\sum_{k=1}^5 C_k h_k^* \right) \rho u y dy,$$

имеют также качественно и количественно близкие формы. Длины фронта пламени этих горючих меняются в пределах 19,70...20,23 (разница составляет не более 3%), а формы фронтов близкие (рис. 1), несмотря на то, что безразмерные плотности горючих меняются в пределах 0,3329...0,3609, а теплотворные способности – 11486...11985 ккал/кг. Температура на фронте пламени составила 2500...2510 К.

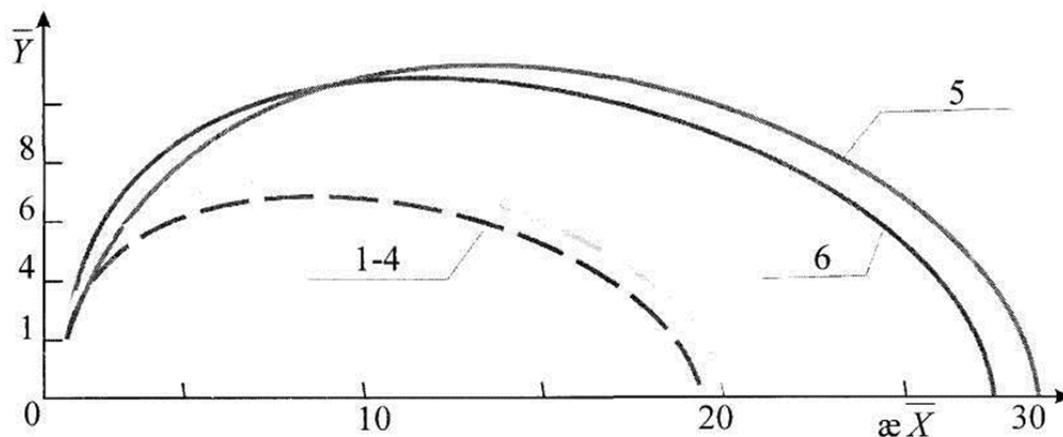


Рис. 1. Формы фронтов пламени в осесимметричной струе при горении природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе

Выводы

Наибольшее отличие наблюдается при сжигании горючих газов с составами 5 и 6 по сравнению с горючими 1–4. Благодаря большей плотности, чем составы 1–4, их осевые значения скорости убывают медленнее, а граница пограничного слоя сужается. Этот факт обусловлен не только начальными значениями плотности, но и величиной теплоты сгорания рассматриваемых горючих составов. Поэтому процесс смешения происходит медленнее, что в конечном итоге приводит к удлинению фронта пламени (рис. 2).

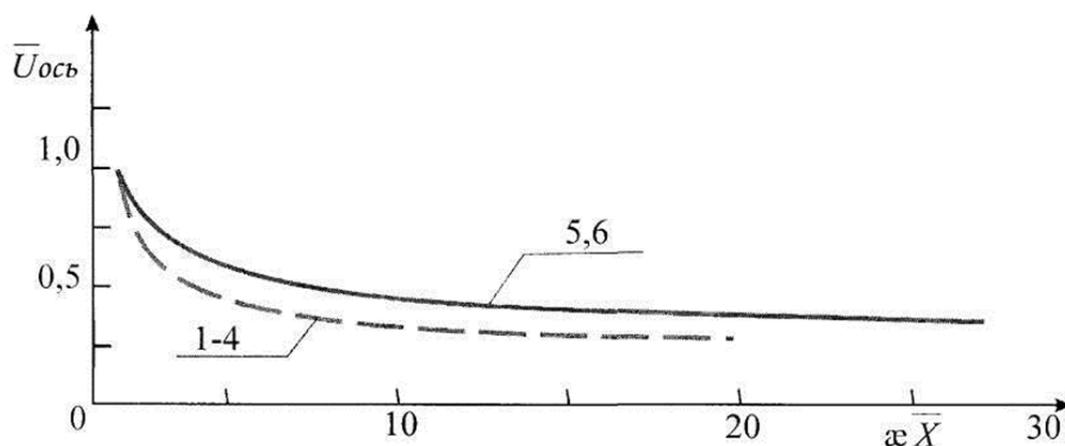


Рис. 2. Осевые значения скорости осесимметричной струи природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе при наличии диффузионного факела

Полученные результаты проверены с помощью интегралов сохранения импульса и полной энтальпии. Интегралы сохраняли свои значения с точностью до 5,0 %.

Частным случаем рассмотренной задачи и методики расчета является процесс горения пропанобутановой смеси, рассмотренной в [1, 2].

При решении задач диффузионного горения газа в воздухе вместо природного газа можно принимать горючую смесь, состоящую из метана (состав 3 табл. 1) или из смеси метана с азотом

(состав 4 табл. 1), т.е. только с одним горючим компонентом, что намного упрощает решение задачи. В связи с этим приведенные результаты расчетов следует отнести к диффузионному горению смеси природного и доменного газов в воздухе.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Расчет турбулентного факела, образованного при сжигании попутных газов некоторых объектов азотной промышленности / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 4. – С. 66–69.
2. Юрков, Н. К. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков, // Труды международного симпозиума Надежность и качество сложных систем. – 2016. – Т. 1. – С. 163–165.

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной математики,
Муромский институт Владимирского
государственного университета
(602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 25)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Shtjkov Roman Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(602264, 25 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Аннотация. Сформулирована и решена задача процесса диффузионного горения горючей смеси с пятью горючими компонентами. Показано, что факелы сжиженных газов в осесимметричной струе в 1,5 раза длиннее факелов природного газа, а длина диффузионных факелов природных газов и чистого метана отличаются не более чем на 3%. Суммирование концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя, стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени, показывает адекватность расчета процесса образования круглой турбулентной струи.

Ключевые слова: турбулентная струя, газ, параметры, факел, горение.

Abstract. The problem of diffusion combustion of a combustible mixture with five combustible components is formulated and solved. It is shown that the flares of liquefied gases in an axisymmetric jet are 1.5 times longer than natural gas flares, and the length of diffusion flares of natural gases and pure methane differ by not more than 3%. The summation of the concentrations of the components in the fuel and oxidizer zones, the stoichiometric intake of combustible gases and oxygen (air) to the flame front, show the adequacy of calculating the formation of a circular turbulent jet.

Key words: turbulent jet, gas, parameters, torch, combustion.

УДК 681.324

Штыков Р. А.

Процесс образования круглой турбулентной струи природного и сжиженного газов в диффузионном факеле / Р. А. Штыков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 85–89. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-11.