

Р. А. Штыков

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

R. A. Shtykov

THE PROCESS OF FORMATION OF A CIRCULAR TURBULENT JET NATURAL AND LIQUEFIED GASES IN A DIFFUSION FLARE

Аннотация. *Актуальность и цели.* Полнота сгорания горючих газов – одно из основных показателей топливосжигающих установок – тесно связана с равномерностью распределения активных компонентов в «рабочих телах». Поэтому в инжекционных газогорелочных установках промышленного и бытового назначения, в камерах внутреннего сгорания предусмотрены участки (или камеры), где протекает предварительное смесеобразование реагирующих сред без горения. *Материалы и методы.* В настоящей статье приводятся модификации модели диффузионного горения для перечисленных выше случаев. Дано общее представление этих модификаций, учитывающих каждый химический элемент в ходе решения диффузионной задачи о сохранении и переносе масс и признающих наличие единого фронта для всех горючих компонентов фронта пламени. *Результаты.* 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 длины диффузионных факелов природных газов и чистого метана отличаются не более чем на 3 %. *Выводы.* Суммирование концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя, стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени, показывают адекватность расчета процесса образования круглой турбулентной струи.

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

Abstract. *Background.* The completeness of combustion of combustible gases – one of the main indicators of fuel-burning plants – is closely related to the uniformity in the distribution of active components in «working bodies». Therefore, in the injection gas burners for industrial and domestic purposes, in internal combustion chambers, sections (or chambers) are provided where preliminary mixture formation of the reacting media without burning takes place. *Materials and methods.* In this paper, modifications of the diffusion combustion model for the cases listed above are given. The general representation of these modifications, taking into account each chemical element in the course of solving the diffusion problem of conservation and mass transfer and recognizing the existence of a united front for all combustible components of the flame front. *Results.* 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 %. *Conclusions.* Summation of the concentrations of components in the fuel and oxidizer zones, 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.

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 [1].

Постановка задачи

При умеренных скоростях процесс описывается уравнениями теории турбулентного пограничного слоя многокомпонентного газа с соответствующими граничными условиями с той разни-

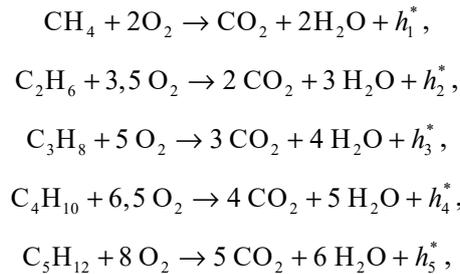
цей, что способ приведения N уравнений сохранения количества i -го компонента к одному уравнению еще не известен, а для температуры имеем

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

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 [2]:



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



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

$$\langle C_{O_i} \rangle_1 = \sum_{i=1}^5 \langle C_{O_i} \rangle_1. \tag{1}$$

Для каждого горючего компонента вводится консервативная функция \tilde{C}_i , местоположение фронта пламени i -го горючего определяется из условия [3]

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

где

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

при $i = 1, 2, 3, 4$ и 5 .

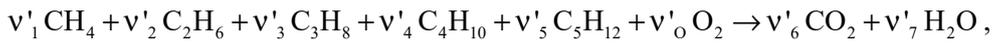
На основе гипотезы наличия единого фронта пламени имеем

$$\frac{v_{o1} m_o \langle C_1 \rangle_2}{v_1 m_1 \langle C_{O1} \rangle_1} = \frac{v_{o2} m_o \langle C_2 \rangle_2}{v_2 m_2 \langle C_{O2} \rangle_1} = \frac{v_{o3} m_o \langle C_3 \rangle_2}{v_3 m_3 \langle C_{O3} \rangle_1} = \frac{v_{o4} m_o \langle C_4 \rangle_2}{v_4 m_4 \langle C_{O4} \rangle_1} = \frac{v_{o5} m_o \langle C_5 \rangle_2}{v_5 m_5 \langle C_{O5} \rangle_1}. \tag{2}$$

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

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

и составим единое стехиометрическое уравнение



где

$$v'_0 = 1, v'_1 = \frac{\langle C_{O1} \rangle_1}{2,0 \langle C_O \rangle_1}, v'_2 = \frac{\langle C_{O2} \rangle_1}{3,5 \langle C_O \rangle_1},$$

$$v'_3 = \frac{\langle C_{O3} \rangle_1}{5,0 \langle C_O \rangle_1}, v'_4 = \frac{\langle C_{O4} \rangle_1}{6,5 \langle C_O \rangle_1}, v'_5 = \frac{\langle C_{O5} \rangle_1}{8,0 \langle C_O \rangle_1},$$

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

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 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 [4]

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

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

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \left(\langle C_{i>2} \rangle + \langle C_{O1} \rangle_1 \frac{v_i m_i}{v_{O1} m_O} \right) \bar{C} - \langle C_{O1} \rangle_1 \frac{v_i m_i}{v_{O1} m_O}, & i = 1 \dots 5 \\ \left(\langle C_{i>1} \rangle + \frac{m_i}{m} \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok}}{v_{Ok}} \langle C_{Ok} \rangle_1 \right) (1 - \bar{C}) - \langle C_{i>2} \rangle_2 \bar{C}, & i = 6 - 7. \end{cases}$$

Таким же образом можно получить, что при выполнении условия $\bar{C}^* > \bar{C} \geq 0$ практически отсутствуют горючие компоненты, т.е. можно принять: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 0$ и

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \langle C_O \rangle_1 - \left(\langle C_O \rangle_1 + m_O \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok}}{v_k m_k} \langle C_k \rangle_2 \right) \bar{C}, & i = 0 \\ \langle C_{i>1} \rangle + \left(\langle C_{i>2} \rangle - \langle C_{i>1} \rangle m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{ik}}{v_{Ok} m_k} \langle C_k \rangle_2 \right) \bar{C}, & i = 6 - 7, \end{cases}$$

где

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

На основе второй части уравнения определим концентрацию молекулярного азота

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

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

$$T_1 = 300 \text{ K}, \quad T_2 = 500 \text{ K}, \quad < C_o >_1 = 0,232 \text{ кг/кг},$$

$$< C_8 >_1 = 0,768 \text{ кг/кг}, \quad h_1^* = 11985 \text{ ккал/кг}, \quad h_2^* = 11375 \text{ ккал/кг},$$

$$h_3^* = 11102 \text{ ккал/кг}, \quad h_4^* = 10950 \text{ ккал/кг}, \quad h_5^* = 11091 \text{ ккал/кг},$$

$$h_0^* = h_6^* = h_7^* = h_8^* = 0 \text{ ккал/кг}.$$

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

Составы горючего принимали согласно данным табл. 1.

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.

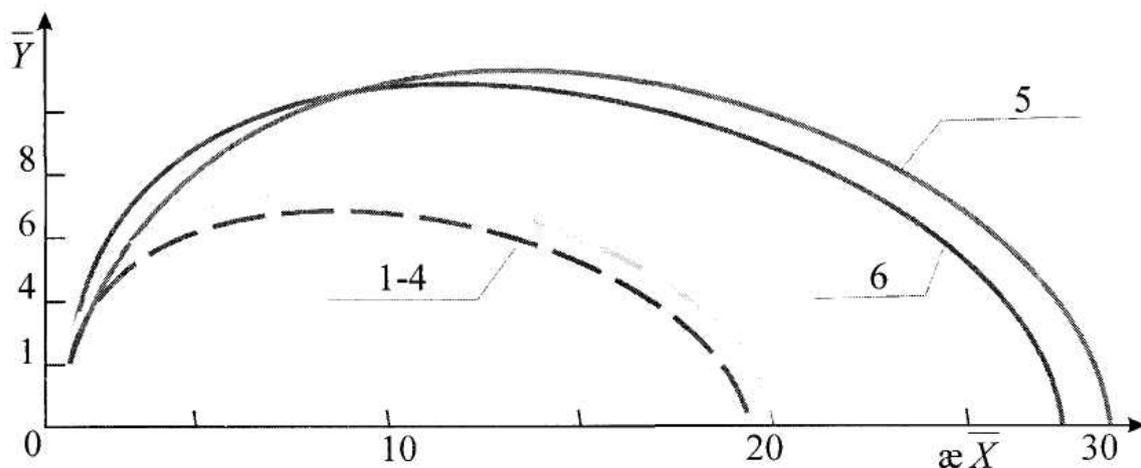


Рис. 1. Формы фронтов пламени в осесимметричной струе при горении природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе

Заключение

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.

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

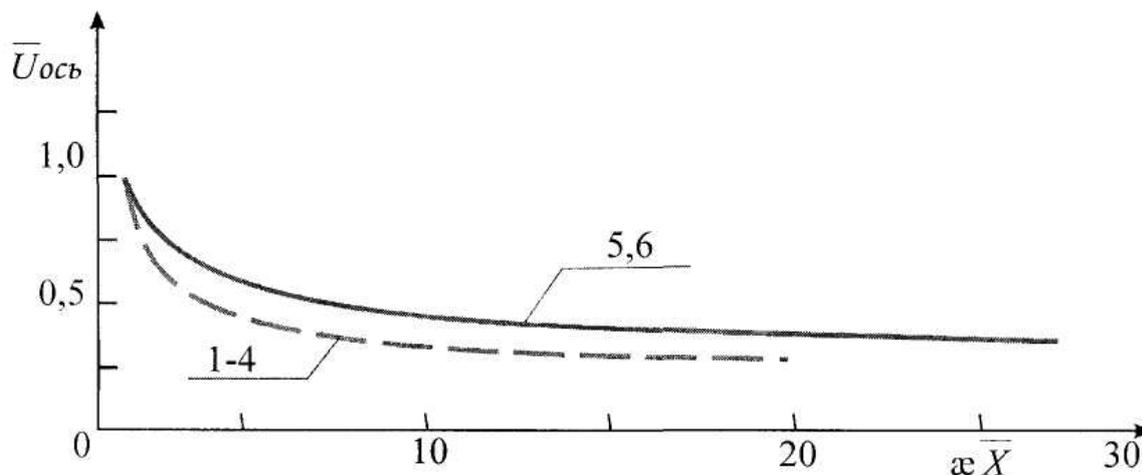


Рис. 2. Осевые значения скорости осесимметричной струи природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе при наличии диффузионного факела

Частным случаем рассмотренной задачи и методики расчета является процесс горения пропанобутановой смеси, рассмотренной в [5, 6].

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.

Библиографический список

1. Штыков, Р. А. Идентификация параметра сопротивления трубопроводов методом аппроксимации по параболическому закону / Р. А. Штыков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 186–188.
2. Штыков, Р. А. Путевое изменение коэффициента сверхсжимаемости газа на однопунктных и многоточечных участках магистрального газопровода / Р. А. Штыков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 145–148.
3. Штыков, Р. А. Методика решения задач горения многокомпонентного газа (статья) / Р. А. Штыков, Г. П. Разживина, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 264–266.
4. Штыков, Р. А. Точное определение гидродинамических параметров рабочего колеса компрессорной станции / Р. А. Штыков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – № 2. – С. 147–150.
5. 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.
6. Юрков, Н. К. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – № 1. – С. 163–165.

References

1. Shtykov R. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 2, pp. 186–188.
2. Shtykov R. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 145–148.
3. Shtykov R. A., Razzhivina G. P., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 1, pp. 264–266.
4. Shtykov R. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 147–150.
5. Yurkov N. K., Shtykov R. A. *Uspekhi sovremennoy nauki* [Successes of modern science]. 2016, no. 4, pp. 66–69.
6. Yurkov N. K., Shtykov R. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of The international Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 1, pp. 163–165.

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной математики,
Муромский институт
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых
(602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Shtykov Roman Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
named after Aleksandr Grigor'evich
and Nikolay Grigor'evich Stoletovy
(602264, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

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. – 2018. – № 4 (24). – С. 71–76. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-7.