

## МОДЕЛЬ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-БУТАНОВОЙ СМЕСИ И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ОТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

**Акрам Пиримович Пиримов**

Навоийский государственный педагогический институт

**Бахтиёр Хайитович Унгаров**

Навоийский государственный педагогический институт

**Гулшаной Турдиевна Жураева**

Навоийский государственный педагогический институт

### АННОТАЦИЯ

На основе уравнений для многокомпонентных турбулентных реагирующих газовых смесей численно моделируется пространственное горение турбулентных струй в топочных устройствах. Получены зависимости влияния скорости вторичного воздуха и состава газовых компонентов на конфигурацию факела при диффузионном процессе горения. Выявлено влияние режимных параметров на увеличение размеров факела, возникающее при взаимодействии вторичного воздуха с газовыми компонентами.

**Ключевые слова:** горения, газовой смесь, сжигание, однородный смесь, гомогенный факел, аэродинамика газов, диффузионное горения, реагирующие вещества, топлива и окислитель, кинетическое горение, неперемешанные газы, стационарный факел, избыточная концентрация.

### ABSTRACT

On the basis of equations for multicomponent turbulent reacting gas mixtures, the spatial combustion of turbulent jets in furnaces is numerically simulated. The dependences of the influence of the velocity of the secondary air and the composition of the gas components on the configuration of the flame during the diffusion process of combustion are obtained. The influence of operating parameters on an increase in the size of the flame, which occurs when the secondary air interacts with gas components, is revealed.

**Keywords:** combustion, gas mixture, combustion, homogeneous mixture, homogeneous torch, aerodynamics of gases, diffusion combustion, reactants, fuels and oxidizer, kinetic combustion, unmixed gases, stationary torch, excess concentration.

## **ВВЕДЕНИЕ**

При горении газовой смеси обычно различают два предельных случая – сжигание предварительно подготовленной однородной смеси (гомогенный факел) и сжигание неперемешанных газов (диффузионный факел).

В дальнейшем речь будет идти в основном о втором случае, в котором при некоторых допущениях удастся получить на основе аэродинамических соображений замкнутую, удовлетворительно согласующуюся с опытом, систему расчёта. Сделаем, однако, некоторые общие замечания по существу общепринятой классификации и характера процесса в газовом факеле.

Противопоставление диффузионного горения газов гомогенному при более внимательном анализе вопроса не является в достаточной мере обоснованным. Более правильным, на наш взгляд, будет противопоставление диффузионного горения кинетическому, как и обычно, в теории горения.

Под диффузионным горением следует понимать горение, для которого характерно наличие фронта пламени, схематизируемого как поверхность, на которой концентрация реагирующих веществ (смеси или разделенных первоначально компонентов) равна нулю. При этом к поверхности горения, на которой интенсивно (практически бесконечно но большой скоростью) протекает реакция, происходит диффузия горючих веществ (топлива и окислителя) из окружающего объема.

В противоположность этому, кинетическим горением назовём такой тип процесса, когда реакция в горючей смеси (созданной предварительно или успевающей образоваться в ходе самого процесса горения вследствие сравнительно малой скорости химической реакции) протекает в объеме газового факела при местных значениях концентрации реагентов.

## **ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ**

Общим случаем промежуточной области горения будет, очевидно, случай, когда в факеле образуются зоны конечной, заметной толщины, соизмеримой с размерами факела. В этом случае значения концентрации реагирующих газов в зоне горения отличаются от таковых в объеме вне фронта и от нуля.

Практически для промышленного газового факела речь идет почти всегда о наличии достаточно узкого фронта пламени (выделенного или сложным образом распределенного в объеме) и переход к кинетическому горению равносильен срыву пламени. Поэтому, как и в других задачах теории горения,

для развитого стационарного факела кинетические закономерности процесса горения отходят на второй план перед закономерностями переноса, в первую очередь перед аэродинамикой газового потока. При этом диффузионное горение перемешанных газов резко отличается по своим свойствам от горения однородной смеси.

В первом случае, как правило, ход процесса смешения регулирует выгорание газов и, в частности, определяет местоположение фронта. Смешать газы и сжечь их-так коротко можно сформулировать закон такого рода горения.

Во втором случае – при сгорании во фронте предварительно перемешанной смеси – ход выгорания ее определяет, обуславливает диффузионный приток горючего; процессы горения и смешения внешне как бы меняются местами. Однако и в этом случае турбулентного факела сохраняется важное значение аэродинамики потока - в этом процессе турбулентность влияет на скорость распространения пламени, т.е. не только смешение, но и на само сгорание и опять таки на местоположение фронта. Оставляя в стороне горение предварительно перемешанной смеси, обратимся к горению не перемешанных газов.

С позицией струйной аэродинамики этот случай диффузионного факела изучался В.А.Швабом[1] и др.: большое значение для понимания процесса имеет, в частности, исследование Я.В. Зельдовича [2,3].

В данном параграфе излагается модель диффузионного горения, в случае истечения горючей смеси газа из прямоугольного сопла и распространяющегося в затопленном (спутанном) потоке воздуха. рис.1.

## ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предполагается, что реакция протекает в зоне соприкосновения горючего с окислителем. Эту зону, являющуюся бесконечно тонкой поверхностью, называют фронтом пламени. На поверхности фронта пламени потоки окислителя и горючего должны удовлетворять условию стехиометрического равенства расходуемых в образующихся веществ:

$$\dot{w}_i v_3 m_3 + \dot{w}_3 v_i m_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

также концентрации окислителя и горючего на фронте пламени равны нулю:

$$(C_1)_\phi = (C_2)_\phi = 0 \quad (2)$$

Уравнение) для модели диффузионного горения можно привести к более компактному виду. Запишем его для  $i = 1, i = 2$ .

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial C_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_i}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial C_i}{\partial z} \\ = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left( \hat{\mu} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left( \hat{\mu} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \dot{w}_i \end{aligned} \quad (4)$$

и для  $i = 3$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial C_3}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_3}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial C_3}{\partial z} \\ = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left( \hat{\mu} \frac{\partial C_3}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left( \hat{\mu} \frac{\partial C_3}{\partial z} \right) + \dot{w}_3 \end{aligned} \quad (5)$$

Складывая (4) и (5), предварительно умножив обеих сторон их соответственно на  $v_3 m_3$  и  $v_i m_i$ , получим

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (C_i v_3 m_3 + C_3 v_i m_i) + \rho v \frac{\partial}{L \partial y} (C_i v_3 m_3 + C_3 v_i m_i) + \rho w \frac{\partial}{\partial z} (C_i v_3 m_3 + \\ C_3 v_i m_i) = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left( \hat{\mu} \frac{\partial}{\partial y} (C_i v_3 m_3 + C_3 v_i m_i) \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left( \hat{\mu} \frac{\partial}{\partial z} (C_i v_3 m_3 + \right. \\ \left. C_3 v_i m_i) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь использовано условие стехиометрического равенства количества расходуемых и образуемых веществ (1) Уравнение (6) перепишем в виде

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial \tilde{C}_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \tilde{C}_i}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial \tilde{C}_i}{\partial z} \\ = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left( \hat{\mu} \frac{\partial \tilde{C}_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left( \hat{\mu} \frac{\partial \tilde{C}_i}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\tilde{C}_i = C_i v_3 m_3 + C_3 v_i m_i, \quad i = \overline{1:3} \quad (8)$$

Использование консервативной функции Шваба-Зельдовича [99] относительно избыточных концентраций:

$$\tilde{C}_i = \frac{\tilde{c}_i - (\tilde{c}_i)_1}{(\tilde{c}_i)_2 - (\tilde{c}_i)_1}, \quad i = \overline{1:3} \quad (9)$$

Не изменяет вид уравнения (7):

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \tilde{C}}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} \\ = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left( \hat{\mu} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left( \hat{\mu} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Функция  $\tilde{C}$  принимает в срезе сопла горячего значение 1, а в зоне воздуха 0. Введение (8) позволяет освободиться от источникового члена в уравнении диффузии к одному для четырёхкомпонентной смеси, так как при  $C_i = C_4$  для инертного газа тоже получим эквивалентного уравнения. При конечной скорости реакции необходимо интегрировать уравнение диффузии для каждого компонента в отдельности.

Используя условие (2) из соотношений (8) находим

$$\begin{cases} (\tilde{C}_1)_\Phi = (\tilde{C}_3)_\Phi v_1 m_1 \\ (\tilde{C}_2)_\Phi = (\tilde{C}_3)_\Phi v_2 m_2 \end{cases} \quad (11)$$

Используя (1.40), из (1.38) определим  $C$  на фронте племени:

$$\frac{v_3 m_3}{v_1 m_1} (C_1)_1 (1 - \tilde{C}_\Phi) = \frac{v_3 m_3}{v_2 m_2} (\tilde{C}_\Phi) (C_2)_2, \quad \text{или} \quad \frac{(C_1)_1}{v_1 m_1} = \left[ \frac{(C_1)_1}{v_1 m_1} + \frac{(C_2)_2}{v_2 m_2} \right] (\tilde{C}_\Phi)$$

$$\text{Отсюда, } \tilde{C}_\Phi = \frac{1}{1 + \frac{v_1 m_1 (C_2)_2}{v_2 m_2 (C_1)_1}} \quad (12)$$

Из (8), (1.9) найдём распределение относительной избыточной концентрации горючего, окислителя, продукта реакции при помощи следующих граничных условий:

$$\begin{cases} (\tilde{C}_1)_1 = (C_1)_1 v_3 m_3, & (\tilde{C}_1)_2 = 0, \\ (\tilde{C}_2)_1 = 0, & (\tilde{C}_2)_2 = (C_2)_2 v_3 m_3, \end{cases} \quad (13)$$

Условие  $\tilde{C} > \tilde{C}_\Phi$  соответствует области горючего  $O$ , где концентрации компонентов определяются в виде

$$\begin{cases} C_1 = 0 \\ C_2 = \tilde{C} \left[ (C_2)_2 + (C_1)_1 \frac{v_3 m_3}{v_1 m_1} \right] - \frac{v_2 m_2}{v_1 m_1} (C_1)_1 \\ C_3 = (C_1)_1 \frac{v_3 m_3}{v_1 m_1} (1 - \tilde{C}), \end{cases} \quad (14)$$

а для зоны окислителя, где наполняется условие  $\tilde{C} < \tilde{C}_\Phi$  соответствует области горючего  $\tilde{L}(y, z) > \tilde{L}_\Phi(y, z)$ , концентрации компонентов определяется в виде

$$\begin{cases} C_2 = 0 \\ C_1 = (C_1)_1 - \left[ (C_1)_1 + \frac{v_1 m_1}{v_2 m_2} (C_2)_2 \right] \tilde{C} \\ C_3 = \frac{v_3 m_3}{v_2 m_2} (C_2)_2 \tilde{C} \end{cases} \quad (15)$$

Распределение относительно избыточной концентрации и граничные условия для инертного газа  $N_2$  будут такими же, как и для  $\tilde{C}$ , поэтому

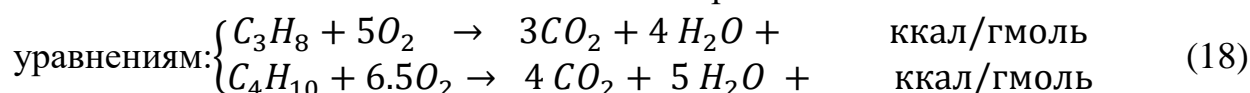
$$\frac{C_4 - (C_4)_1}{(C_4)_2 - (C_4)_1} = \tilde{C} \quad (16)$$

$$C_4 = (C_4)_1 + [(C_4)_1 - (C_4)_2] \tilde{C} \quad (17)$$

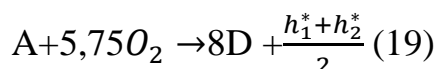
Где выражение (1.46) действительно во всей исследуемой области теплообмена. Формулы (14) – (15), при известном  $\tilde{C}$  позволяют однозначно найти значения концентраций всех компонентов в области течения. Достоверность определения концентрации компонентов можно проверить с помощью тождества

$$\sum_{i=1}^{N_K} C_i = 1.$$

В качестве примера было изучено горение пропано-бутановой смеси в воздухе с различными значениями параметров струи. Реакции протекают согласно стехиометрическому



т.к.  $0.5(C_3H_8 + C_4H_{10})$  г.моль составляет 1 гмоль горючей смеси, которую обозначим через А, то единое стехиометрическое уравнение можно представить как:



Необходимо для расчёта параметры горючего А и продукта горения  $D = (7CO_2 + 9H_2O)/2$  (теплоёмкость, молекулярный вес, теплотворная способность) определяются согласно законам термодинамики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, с точки зрения математического расчета, рассмотрим четырехкомпонентную смесь газов в зоне смешения, состоящую из кислорода  $O_2$  индекс “1”, смеси пропана – бутана  $(C_3H_8 + C_4H_{10})$ -“2” продуктов горения  $CO_2 + 9H_2O$  – “3”, инертного газа  $N_2$  – “4”

На рисунке 2 (а,б) приведены пространственные и на фиксированной плоскости координаты распределения концентраций по фронту пламени.

Уравнение (11) дополняется следующими граничными условиями:

I.  $x = 0$ :

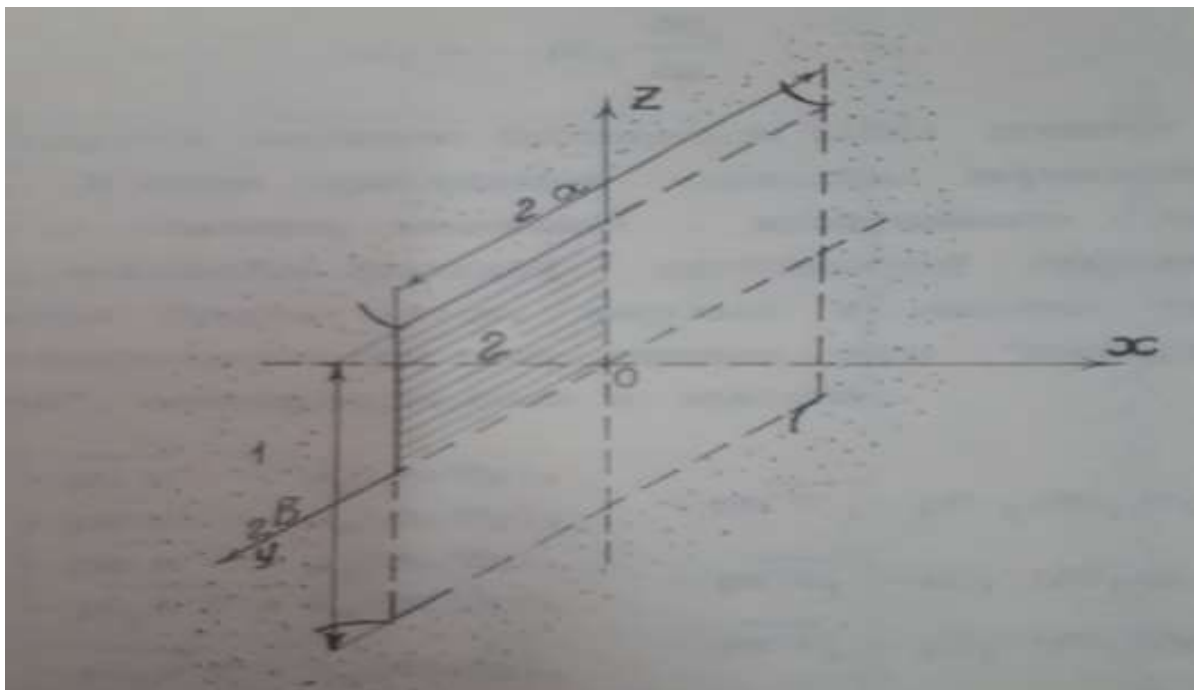


Рис.1.1. Картина течения

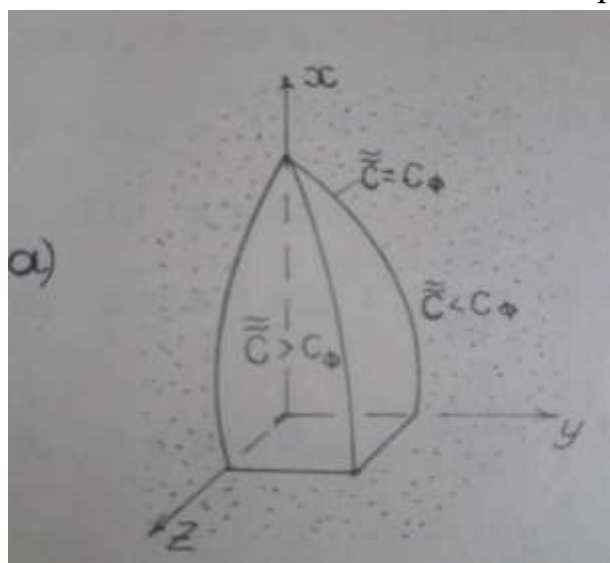


Рис. 2а Пространственная форма факела  
 максимальных температур.

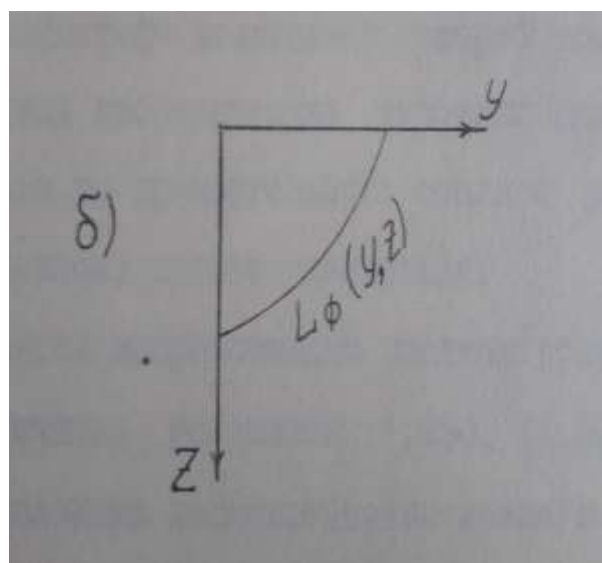


Рис. 2 б Линия  
 максимальных температур.

$$\begin{cases} 1) 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1; \tilde{c} = 1. \\ 2) 1 < y < y_{+\infty}, 1 < z < z_{+\infty}; \tilde{c} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

II.  $x > 0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) y = 0, 0 \leq z < z_{+\infty}; \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y} = 0 \\ 2) z = 0, 0 \leq y < y_{+\infty} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} = 0 \\ 3) z \rightarrow z_{+\infty}, y \rightarrow y_{+\infty}; \tilde{c} \rightarrow 0. \end{array} \right. (21)$$

## REFERENCES

1. В.А. Швабь. Связь между температурными и скоростными моделями газового факела. // Сб. "Исследование процессов горения натурального топлива", под ред. Г.Ф. Кнорре, Госэнергоиздат, 1948.
2. Зельдович Я.Б. К теории горения неперемешанных газов. // Журнал технической физики. т. 14., вып. 10., 1949, с