

УДК 621.436

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ИСТЕЧЕНИЕ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ГАЗА ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СОПЛА

Ходжиев С.

В данной работе излагается трёхмерная модель диффузионного горения в случае истечения горючей смеси газа из прямоугольного сопла и распространяющиеся в затепленном (спутном) потоке окислителя-воздуха. Подробно описывается метод для трёхмерного случая преобразование многокомпонентное уравнение концентрации использованием консервативной функции Шваба – Зельдовича относительно избыточных концентраций приводящие число уравнений диффузии к одному для четырёхкомпонентной смеси. Используется предположение, что на поверхности фронта пламени потоки окислителя и горючего должны удовлетворять условию стехиометрического равенства расходуемых и образующихся веществ на фронте пламени равны нулю.

Ключевые слова: трехмерность, горение, диффузионное, струя, турбулентность, реагирующих, поток, факел, фронт, компоненты, стехиометрия.

Ушбу мақолада кесими тўғри тўғри тўтбурчак бўлган соплодан оқиб чиқаётган ёнувчан газ аралашмасининг ташқи ҳавога тарқалиб турбулент диффузион ёниш уч ўлчовли модели келтирилган. Уч ўлчовли ҳол учун Шваб-Зельдович консерватив функциясини қўллаб тўрт компонентали концентрация тенгламасини битта диффузия тенгламасига келтириш методи тўлиқ баён қилинган. Оқим жараёни математик модели сифатида уч ўлчовли параболалашган Навье-Стокс тенгламалар системаси олинган ва тубулент ёпишқоқликни ҳисоблаш учун тезликларни ва температурани фазовий ўзгаришларини ҳисобга олувчи алгебраик модел қўлланилган. Ёнувчан газ пропан-бутан бошланғич бўйланма тезлиги ва температуранинг йўлдош ҳаво оқими билан қўшилиб тарқалиши ва диффузион ёнишда аланга параметрларига таъсири сонли ўрганиш натижвлари графиклар ва жадвал кўринишида келтирилган.

Калит сўзлар: Уч ўлчовли, диффузион, ёниш, аралашма, аланга, оқим, турбулент, компонента, стехиометрия, параболалашган.

In this paper, a three-dimensional model of diffusion combustion is presented in the case of the outflow of a combustible gas mixture from a rectangular nozzle and propagating in a heated (co-current) flow of oxidizer-air. A

method is described in detail for the three-dimensional case of transforming the multicomponent concentration equation using the conservative Schwab-Zeldovich function with respect to excess concentrations, which reduces the number of diffusion equations to one for a four-component mixture. The assumption is used that on the surface of the flame front, the flows of the oxidizer and fuel must satisfy the condition of stoichiometric equality of the consumed and formed substances at the flame front are equal to zero.

For the modelling of the flow, a three-dimensional parabolic system of Navier-Stokes equations is used, and to calculate the turbulent viscosity, an algebraic model is used that takes into account the temperature inhomogeneity and three-dimensionality of the jet. Some of simulation results of the investigation are presented in the form of a graph, as the effect of the initial value of the velocity and temperature of the combustible mixture on the parameters of the jet and flame during diffusion combustion of a propane-butane mixture. It has been observed that increasing of the longitudinal velocity of the fuel from the outlet of a rectangular nozzle with an aspect ratio (1:1) does not always lead to increasing in the maximum temperature at the flame front with other parameters unchanged. The simulation results show that in the initial sections, the influence initial value of the temperature on the transverse distributions of the longitudinal velocity along the axes is insignificant. Heating the fuel and oxidizer leads to a slight elongation of the length of the torch.

Keywords: Three-dimensionality, combustion, diffusion, jet, turbulence, reacting, flow, torch, front, components, stoichiometry.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для описания процесса горения принимаются различные модели на основе закона действующих масс. Одной из простых и распространенных моделей является диффузионное горение. Наиболее общий анализ горения не перемешанных газов выполнен Я.Б. Зельдовичем [1] и было показано, что при горении не перемешанных газов фронт пламени устанавливается в тех точках, где подходящие к фронту потоки реагентов находятся в стехиометрическом соотношении. Одна из первых серьезных попыток построения теории турбулентного диффузионного факела принадлежит В.А.Швабу [7]. Для упрощения расчёта В.А.Шваб исходит из предположения о подобии полей скорости, концентрации и температуры в факеле [2;3].

Более подробный обзор, посвященный исследованиям горения, можно найти в работах [4;5].

Многочисленные работы исследования относились в основном к горению не перемешанных газов в двумерных плоских и осесимметричных турбулентных струях. В работе [6], учитывая, что аэродинамика факела и его устойчивость в значительной степени определяется, структурой течения в не

автомодельной области – зоне формирования и стабилизации факела, для описания трехмерных пламен используется метод эквивалентной задачи теории теплопроводности. В рамках метода эквивалентной задачи теории теплопроводности для вычисления распределения скорости, температуры и концентрации, а также для расчета стехиометрическими соотношениями определяется длина факела, где выведены выражения для инженерных расчетов турбулентного диффузионного факела, истекающего из сопла прямоугольной формы. Подробное численное исследование параметров факела, истекающего из сопла прямоугольной или какой либо сложной формы, в публикациях практически отсутствует, но есть некоторые работы, посвященные пространственным горениям [8÷12].

С учетом широкого применения задачи динамики струйных течений большой интерес представляет изучение распространяющихся реагирующих, струй, вытекающих из прямоугольного сопла с конечным отношением длин сторон.

Такие задачи используются при создании различных топочных устройств, камер сгорания, эффективного сжигание топлива и т.п. Следует, однако, отметить, что основные экспериментальные и малочисленные численные исследования посвящены изучению истечений воздуха [13÷17] а также с химическими реакциями [18÷19].

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Постановка задачи. В данной работе излагается трехмерная модель диффузионного горения в случае истечения горючей смеси газа из прямоугольного сопла со сторонами $2a$, $2b$ и распространяющейся в затопленном (с путном) потоке воздуха (рис.1). Для описания течения используем трехмерные системы уравнений Навье – Стокса для многокомпонентных химических реагирующих газовых смесей [18÷29], имеющий вид.

Уравнение смеси для газов.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0,$$

Уравнение движения по координате x .

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

Уравнение движения по координате y .

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_T \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_T \frac{\partial w}{\partial y} \right),$$

Уравнение движения по координате z .

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_T \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_T \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

Уравнение переноса энергии (полная энтальпия).

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} + \rho w \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial y} (\mu_T \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{1}{Pr_T} \frac{\partial}{\partial z} (\mu_T \frac{\partial H}{\partial z}) + (1 - \frac{1}{Pr_T}) [\frac{\partial}{\partial y} (\mu_T u \frac{\partial u}{\partial y}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_T u \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_T v \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_T w \frac{\partial w}{\partial y})] + (\frac{4}{3} - \frac{1}{Pr_T}) [\frac{\partial}{\partial y} (\mu_T v \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_T w \frac{\partial w}{\partial z})] - \\ - \frac{\partial}{\partial y} (\frac{2}{3} \mu_T v \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_T v \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_T w \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial z} (\frac{2}{3} \mu_T w \frac{\partial v}{\partial y}) \end{aligned}$$

Полная энтальпия.

$$H = c_p T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \sum_{i=1}^{N_k} C_i h_i^*$$

Уравнение состояния газовой смеси.

$$P = \rho T R \sum_{i=1}^{N_k} \frac{C_i}{m_i}$$

Для трехмерного случая в уравнении концентрации i -й компонент имеет вид $\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} + \rho w \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{1}{Sc_T} \left(\mu \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + \dot{\omega}_i$. (1)

Здесь x, y, z – декартовы координаты; u, v, w – компоненты скорости соответственно по оси x, y, z ; ρ – плотность; C_i – массовая концентрация i -того компонента; Sc_T – турбулентное число Шмидта; μ_T – турбулентная вязкость; $\dot{\omega}_i$ – массовая скорость образования i -й компоненты.

Метод решения. Опишем метод преобразования трехмерного уравнения концентрации i -й компоненты приводящий к одному уравнению для четырехкомпонентной смеси газов при диффузионном горении.

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

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

т.е. концентрация окислителя и горючего на фронте пламени равны нулю

$$(C_1)_\phi = (C_2)_\phi = 0. \quad (3)$$

Уравнение (1) для задач (модели) диффузионного горения можно привести к более компактному виду

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} + \rho w \frac{\partial c_i}{\partial z} = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + \dot{\omega}_i \cdot |v_3 m_3 \quad (4)$$

$$\rho u \frac{\partial c_3}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_3}{\partial y} + \rho w \frac{\partial c_3}{\partial z} = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial c_3}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial c_3}{\partial z} \right) + \dot{\omega}_3 \cdot |v_i m_i \quad (5)$$

Складывая (4) и (5), получим

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

Здесь использовано условие стехиометрического равенства количества расходуемых и образуемых веществ (2), или

$$\rho u \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial z} = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где,

$$\tilde{c}_i = C_i v_3 m_3 + C_3 v_i m_i . \quad (8)$$

Использование консервативной функции Шваба-Зельдовича [7] относительно избыточных концентраций

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

не изменяет вид уравнения (7)

$$\rho u \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} = \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \tilde{C}}{\partial z} \right) . \quad (10)$$

Функция \tilde{C} принимает в срезе сопла горючего значения 1, а в зоне воздуха 0 (здесь вторые индексы указывают на принадлежность данного значения к срезу сопла воздуха-1 или горючего-2). Введение функции (9) позволяет освободиться от источника члена в уравнении диффузии (1) и приводит число уравнений диффузии к одному для четырехкомпонентной смеси (10).

При конечной скорости реакции необходимо интегрировать уравнение диффузии для каждого компонента в отдельности.

Используя условие (3), из соотношения (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 (11), из (9) определим значение \tilde{C} на фронте пламени (см.рис.1, где приведена пространственная форма факела), т.е. \tilde{C}_ϕ

$$\frac{v_3 m_3}{v_1 m_1} (C_1)_1 (1 - \tilde{C}_\phi) = \frac{v_3 m_3}{v_2 m_2} (\tilde{C}_\phi) (C_2)_2,$$

или

$$\frac{(C_1)_1}{v_1 m_1} = \left[\frac{(C_1)_1}{v_1 m_1} + \frac{(C_2)_2}{v_2 m_2} \right] (\tilde{C}_\phi),$$

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), (9) найдем распределение относительной избыточной концентрации горючего, окислителя, продукта реакции инертного газа 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, $0 \leq L(y, z) < L_\Phi(y, z)$, концентрации компонентов определяются в виде

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

а для зоны окислителя, где выполняется условие $\tilde{C} < \tilde{C}_\Phi$, $[L(y, z) > L_\Phi(y, z)]$,

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

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

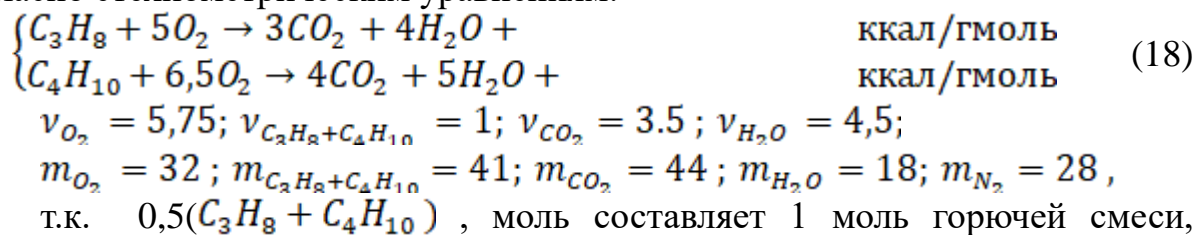
$$\frac{C_4 - (C_4)_1}{(C_4)_2 - (C_4)_1} = \tilde{C} \quad (16)$$

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

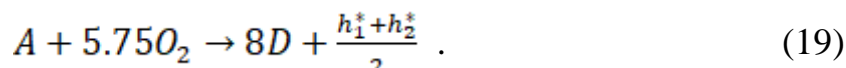
где выражения (17) действительно во всей исследуемой области тепло – и массообмена. Формулы (14–17) при вычислении \tilde{C} позволяют однозначно найти значения концентрации всех компонентов области течения. Достоверность определения концентрации компонент можно проверить с помощью тождества

$$\sum_{i=1}^{N_k} C_i = 1. \quad (N_k - \text{количество компонентов})$$

В качестве примера было изучено горение смеси пропана – бутана в воздухе с различными значениями параметров струи. Реакция протекают согласно стехиометрическим уравнениям:



которую обозначим через A и единое стехиометрическое уравнения можно представить как



Необходимые для расчета параметры горючего A и продукта горения $D = \frac{7CO_2 + 9H_2O}{2}$ (теплоемкость, молекулярный вес, теплопроводность) определяются согласно законам термодинамики.

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". С физической точки зрения в зоне тепло – и массообмена участвуют 6 компонентов.

Численные результаты. Приводим некоторые численные результаты, как влияния исходной значения скорости и температуры горячей смеси на параметры струи и факела.

Для численного решения, описывающего течение использовался эффективный метод [20] подобному SIMPLE [23], что поправки к скорости определяются поправкам к давлению в соответствии с приближенным уравнениями движения, в которых продольные конвективные члены уравновешены членами с давлением.

Для вычисления турбулентной вязкости использовался полуэмпирическая формула учитывающую молекулярный перенос, трехмерность, температурную неоднородность струи в виде [20].

$$\mu = \alpha \rho l^2 (y, z) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)^2} \cdot \left(\frac{T}{T_2}\right)^\alpha .$$

При этом было рассчитано горение пропана-бутановой смеси, истекающей из сопла квадратной формы и распространяющейся в спутном потоке окислителя [6,10,24÷26] при условии:

I. Зона окислителя:

$$T_1 = 300 \text{ K}; u_1 = 0; \quad (C_1)_1 = 0,232, (C_2)_1 = 0; (C_3)_1 = 0; \\ (C_4)_1 = 0,768;$$

II. Зона горючего:

$$T_2 = 1200 \text{ K}; u_2 = 61 \text{ м/с} (18,3; 30; 38 \text{ м/с});$$

$$(C_1)_2 = 0; (C_2)_2 = 0,12; (C_3)_2 = 0; (C_4)_2 = 0,88$$

$$\text{и } P_{ГТ} = S_{ГТ} = 0,65, P_1 = P_2 = 1 \text{ атм.}$$

Варианты исследования и некоторые численные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики	ВАРИАНТЫ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость топлива, м/с	61	61	61	61	18,3	61	30	38
Температура топлива, К	700	900	1200	1200	1200	1100	1200	1200
Температура воздуха, К	300	300	300	500	300	400	300	300
Концентрация топлива, (кг/кг)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Максимальная температура факела, К	1700	1734	1909	1920	1943	1830	1845	1850
Длина фронта пламени, $L_{\Phi}/2b$	24	25,75	26,5	27,5	20,87	26	26,75	26

На рис.2 приведено изменение концентрации горючего C_2 и продукта реакции C_3 вдоль оси затопленного диффузионного факела при скоростях горючего $u_2=18,3$ м/с и 61м/с .

Изменение осевой концентрации свидетельствует о том, что при удалении от среза сопла ее значение уменьшается при $u_2 = 18,3$ м/с быстрее, чем по сравнению с $u_2 = 61$ м/с .

На рис.3 приведена форма факела в зависимости от исходного значения скорости и при этом другие параметры струи и окислителя остались без изменения. Как видно из графика, при изменении скорости u_2 от 18,3 до 30 м/с линейные размеры факела увеличиваются при увеличении u_2 до 61 м/с они практически не изменяются, даже при $u_2= 70$ м/с.

На рис. 4 и 5 показано осевое изменение температуры, концентрации компонентов, динамического напора, а также продольной скорости в зависимости от исходного значения температуры основного потока.

Численные результаты показали, что изменение температуры, концентрации компонентов, динамического напора, а также продольной скорости в зависимости от исходного значения температуры основного потока (T_2) говорят о том, что их поведение правильно отражает физику явления, т.е. увеличение исходного значения температуры приводит к медленному убыванию осевой скорости и динамического напора. При малых исходных значениях температуры струи осевое значение температуры медленно растёт.

Про поперечное распределение концентрации компонентов в зависимости от исходного значения температуры горючей струи, можно

сказать, что и здесь выполняются общеизвестные закономерности, т.е. максимальному значению температуры соответствует максимальное значение продукта реакции и минимальное значение исходных реагентов ($C_1=C_2=0$, $C_3=C_{3\max}$).

На рис. 6 показаны зоны смещения струи в разных сечениях струи в зависимости от исходного значения температуры горячего потока. В этом графике соблюдаются известные закономерности изменения границы, т.е. при подаче более нагретого горячего границы зоны смещения растут более медленно. Однако переход к круглой форме затягивается, т.е. как даже при $\bar{x}=15$, еще полностью не переходит в круглую формы.

Относительно роли и значения температуры можно сказать, что подогрев горячего и окислителя приводит к незначительному удлинению длины факела (рис.7) и граница зоны смешения растет более медленно.

Приведенный метод был реализован в виде программы, которая позволяет провести расчеты истечения струйных не реагирующих и реагирующих струй вытекающих из прямоугольного сопла с конечным отношением длин сторон в спутный (затопленный) поток. В программе учтены задания все начальные и граничные условия, конкретные расчетные шаги по оси x , y и z , точности сходимости итерации и длин сторон сопла, а также условия (точность) завершения расчета, которые входят в комплект исходных данных, поэтому при решении типичных задач не требуется вносить в текст программы какие-либо корректировки и в этом смысле программа является универсальной.

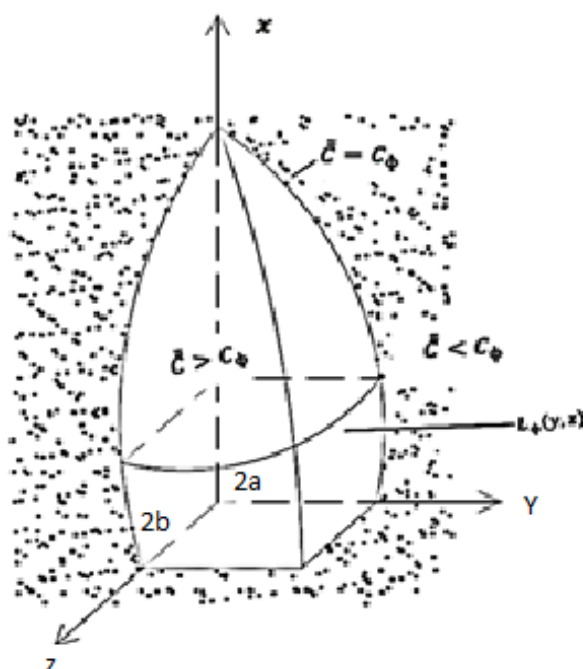


Рис.1. Пространственная форма факела.

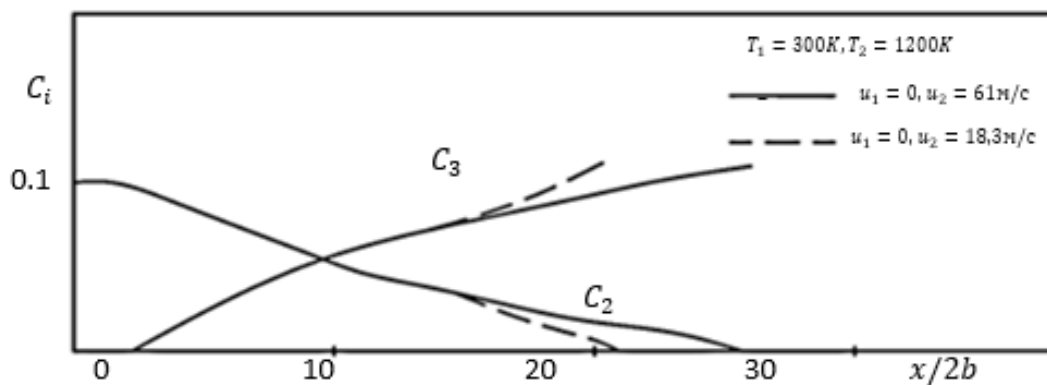


Рис. 2. Изменения концентрации горючего C_2 и продукта реакции C_3 вдоль оси затопленного диффузионного факела диффузионном горении.

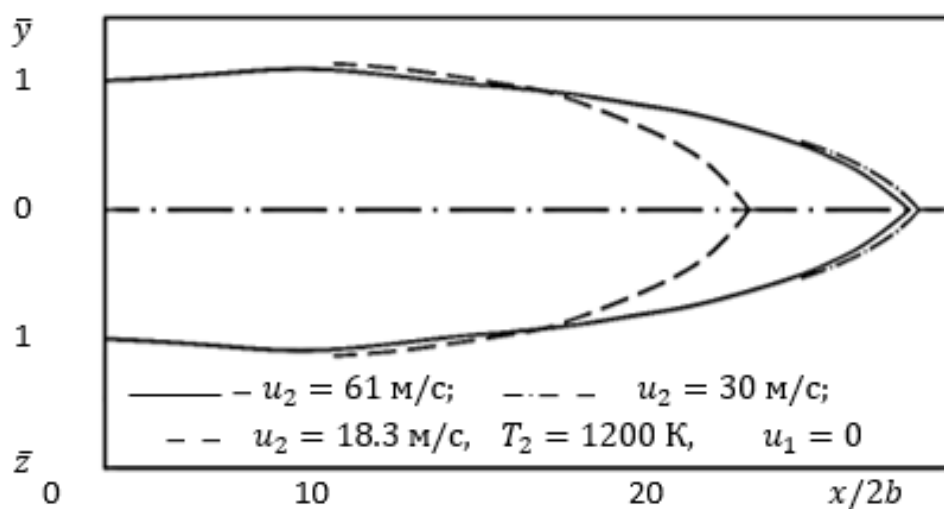


Рис. 3. Конфигурация факела при различных исходных значениях скорости струи.

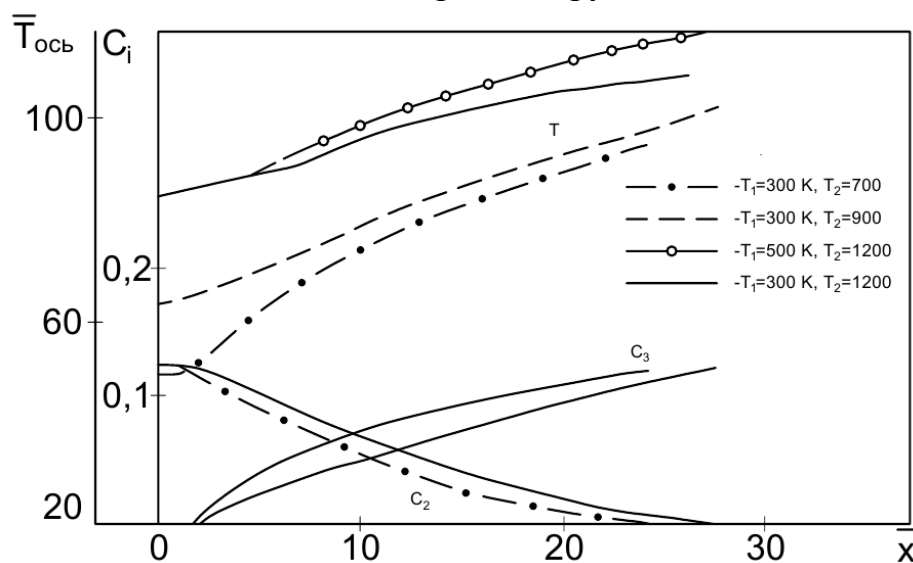


Рис.4. Осевое изменение температуры и концентрации при разных исходных значениях температуры струи

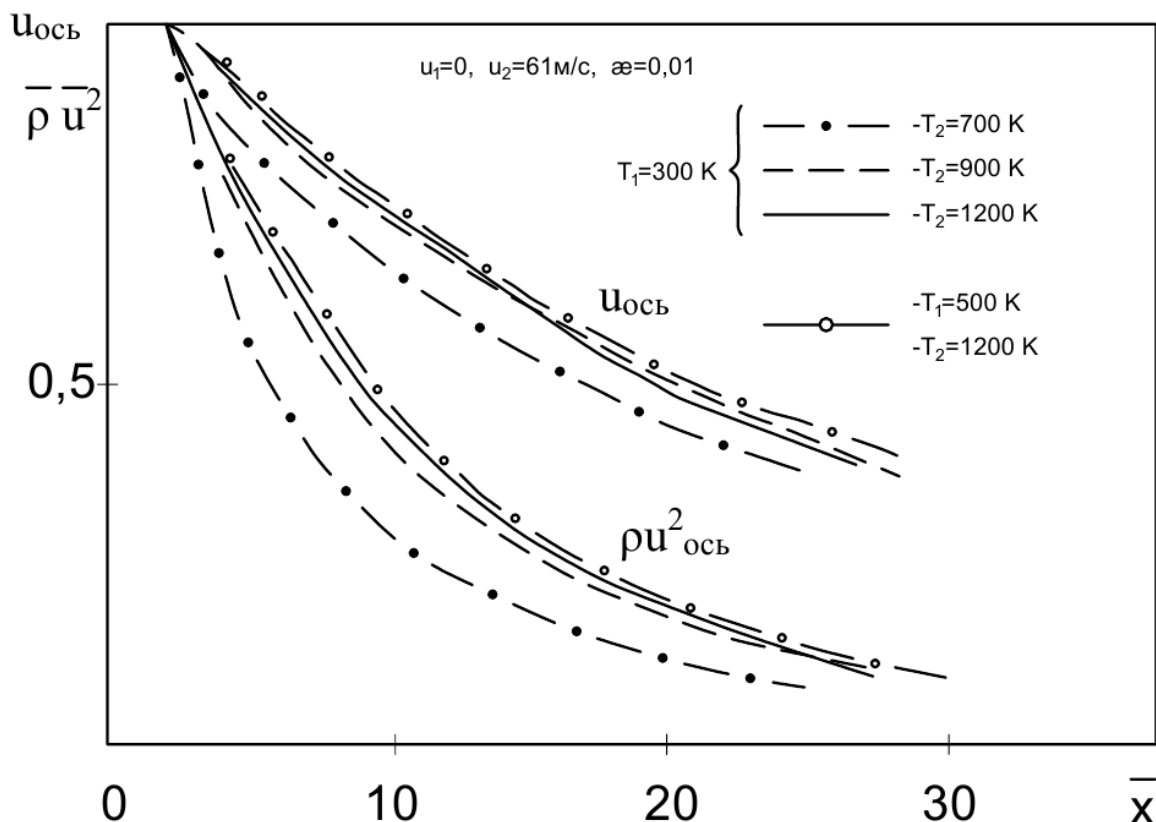


Рис.5. Изменение плотности потока импульса и продольной скорости вдоль оси затопленного диффузионного факела при разных исходных значениях температуры струи

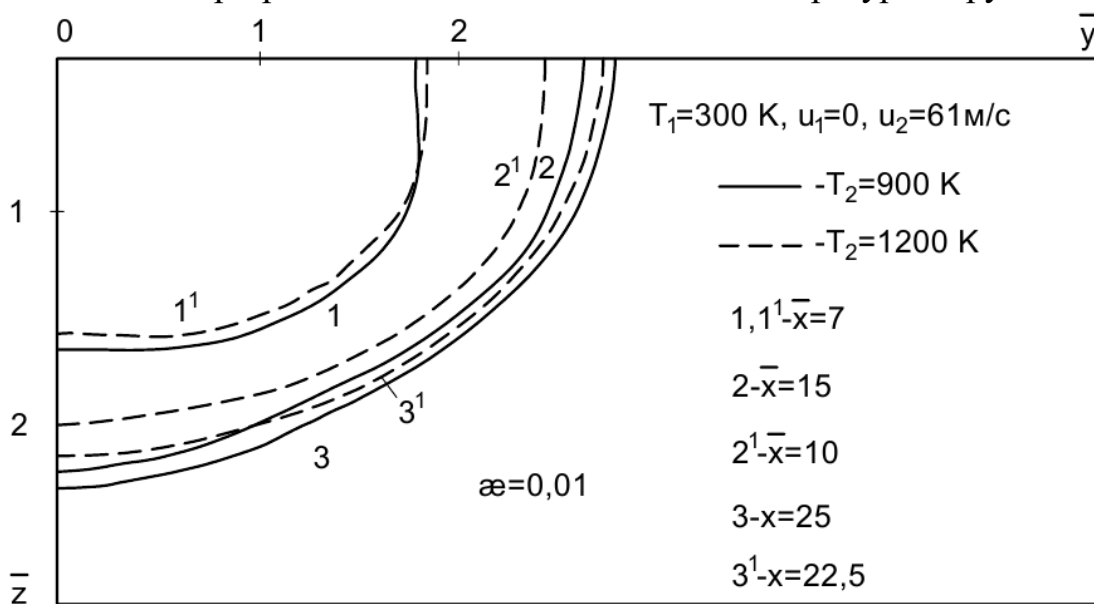


Рис.6. Границы зоны смещения струи в зависимости от исходных значениях температуры струи

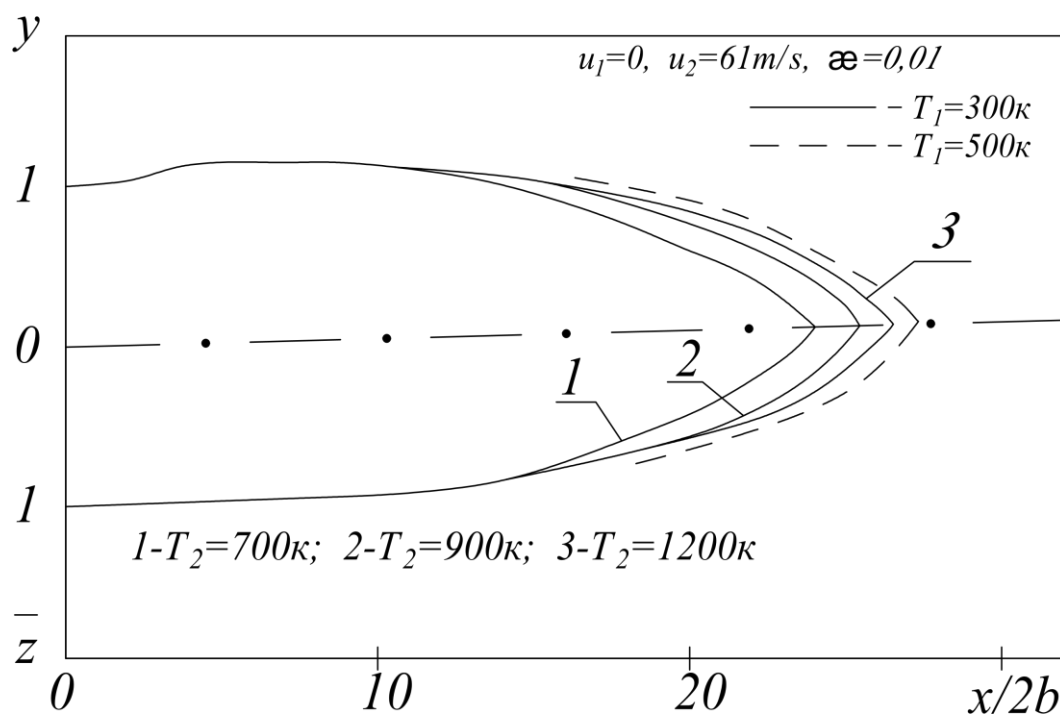


Рис.7. Конфигурация факела при различных исходных значениях температуры струи и окислителя

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При скоростях струи 18, 30, 38 и 61 м/с соответственно максимальная температура доходит до 1943, 1845, 1850 и 1909 К.

Полученные результаты помогают при подборе исходной скорости и температуры получить необходимую длину и, температуру факела при диффузионном горении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Я.Б. Зельдович К теории горения перемещаемых газов. // Журнал Технической физики, Т.19., вып.10, 1949, с. 107-114.
- [2] В. Гаусорн, Д. Уиддел, Г. Хоттел Смешение и горение в турбулентных газовых струях. // Сб. Вопросы горения, Т.1, - М: Изд. иност. лит., 1953, с. 124-145.
- [3] Мэдни, Плетчер. Расчет вынужденных турбулентных восходящих потоков стратифицированной и однородной окружающей среде. Гр. Амер. о-ва. инж. мех., сер. Теплопередача, 1977, N1, с.105.
- [4] Л.А. Вулис Некоторые вопросы физики горения газа. // Теория и практика сжигания газа –Л.: Недра., Вып-2, 1964, с. 156-175.
- [5] Л.А. Вулис К расчету свободных турбулентных, течений с помощью эквивалентной задачи теории теплопроводности. // Изв. АН Каз

- ССР, серия энергетика . 1960 , вып 2 (18).
- [6] Л.А. Вулис, Л.П. Ярин Аэродинамика факела. –Л.: Энергия. 1978. , - 216 с.
- [7] А.В. Шваб Связь между температурными скоростными моделями газового факела. // Сб. “Исследование процессов горения натурального топлива”. Под. ред. Г.Ф. Кнорре, Госэнергоиздат. 1948.
- [8] Г.С. Васильев Полуэмпирическая теория турбулентности для пространственных течений химически реагирующих газовых смесей. // Теор. и прикл. мех. 1979 , 10 , N2, 4, 9 с.52-60.
- [9] В.И. Васильев, Л.Г. Голубцова, С.Ю. Крашенинников, Ю.А. Руди Исследование распространения трехмерных турбулентных струй. // Материалы 5-й Всесоюз. съезда по теор. и прикл. механике. Алма-ата, 27 мая- 3 июня 1981. Аннотация докл. Алма – ата , 1981, с.87-88.
- [10] Л.А. Вулис, Ш.А. Ершин, Л.П. Ярин Основы теории газового факела. –Л.: Энергия. 1968. – 203 с
- [11] N.C.G. Markatos, A. Moulton The computation of steady and Unsteady, turbulent, chemically reacting flows in axis symmetrical domains. Trans Inst. chem. Eng. 1979, 57, N3, P. 156-162. // РФЖ 1980, 1, 1599.
- [12] M.H. Carpenter Three – Dimensional Computation of cross-flow Injection and Combustion in a Supersonic flow. // AIAA Paper-1989, N 1970, p. 1-16.
- [13] И.Б. Палатник, Д.Ж. Темирбаев. О распространении свободных турбулентных струй, вытекающих из насадка прямоугольной формы. Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Изд. АН Казахской ССР: Алма-Ата, 1964. с. 18-28.
- [14] С.И. Исатаев, Г. Толеуов, М.С. Исатаев. Исследование средних характеристик трехмерных турбулентных струй eLIBRARY ID.44757673. Вестник казахского национального университета. Серия физическая. N 2 (41) 2012. с. 54-60.
- [15] P.M. Sforza, N. Trentacoste Further experimental results for three dimensional free jets//AIAA J. 1967.V.5, №5 P. 885-890.
- [16] С.Ю. Крашенинников, Е.Г. Рогальская Распространение струй из прямоугольных сопел, свободных и вблизи экрана // Изв.АН СССР. МЖГ. 1979. №4. с. 39-48.
- [17] С. Ходжиев, Ш.С. Юлдашев, С.А. Махмудов. Исследование начальных участков свободных турбулентных струй, вытекающих из насадок прямоугольной формы. Узбекский журнал. Проблемы механики. ФАН. АН Республики Узбекистан –Ташкент ,1992. с. 64-68.
- [18] S. Khojiev, Sh.S. Yuldoshev, Sh.Sh. Savriev, A.S. Murtazoyev Numerical simulation of three-dimensional turbulent jets of reacting gases Eurasian

- journal of mathematical theory and computer sciences. Innovative Academy Research Support Center, Volume 2 Issue 6, June 2022, ISSN 2181-2861, pages 73-82, www.in-academy.uz, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6778321>.
- [19] С. Ходжиев, А.Х. Авезов, Ш. Муродов Численные моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов вытекающих из сопла прямоугольной, формы на основе “к-ε” модели турбулентности. Научный журнал вестник Бухарского Гос. Университета. Бухоро 2007. №3 с. 81-87.
- [20] С. Ходжиев, З.Ш. Жумаев, А. Примов, З.А. Муминова. Исследование трехмерных турбулентных струй реагирующего газа, истекающего из прямоугольного сопла и распространяющегося в спутном (затопленном) потоке воздуха при диффузионном горении Узбекский журнал “Проблемы механики” –Ташкент ФАН. АН. Республики Узбекистан, 1993. с.28-33.
- [21] Ю.В. Лапин, М.Х. Стерелец. Внутренние течения газовых смесей. Наука . Гл.ред. физ.мат.лит., 1989-368 с.
- [22] Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х Т. Т.2: Пер. с англ.: Мир, 1990, -728-392.
- [23] С. Патанкар. Численные методы решение задач тепло обмена и динамики жидкости. Перевод с англ. – М: Энергоатомиздат, 1984. с. 15-20
- [24] Ф. Алиев, И.К. Хужаев Распространение струй реагирующих газов. Движения одно-и многофазных смесей. Ташкент . 1980. с. 26-45.
- [25] Ф. Алиев, З.Ш. Жумаев Струйные течения реагирующих газов. Ташкент, Фан. 1987. с. 132.
- [26] И.К.Хужаев, М.М.Хамдамов. Численные алгоритмы расчёта турбулентных струйных течений реагирующих газов. Бухара. Дурдона. 2022. - 214 с.
- [27] Йулдошев, Ш. С., Д. Наврузов. Влияние начального распределения концентрации горючего на параметры факела. Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего. 2015.
- [28] Жумаев, З. Ш., Юлдашев, Ш. С. Ж. Жумаев. Об одном методе расчета турбулентного горения при подаче воды в зону факела. //Тезис докладов «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» Казахстан Алмата 11-14 сентября 2003 г.
- [29] С. Ходжиев, Ш.С. Йулдошев, Ш.Ш.Савриев К расчету модели трёхмерного турбулентного диффузионного факела. Science and innovation. International Scientific journal Volume I, ISSUE, UIF-

2022:8.2, ISSN:2181-3337,pag. 1211-1219.DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.7483093>

- [30] S. Khojiev, Sh.S. Yuldoshev, Sh.Sh. Savriev On the calculation of a model of a three-dimensional turbulent diffusion plume. Современные инновации, системы и технологии. Общество с ограниченной ответственностью «Сибирский научный центр ДНИТ». Россия 2022; 2(4) eISSN: 2782-2818. <http://oajmist.com>, EDN: ISHWUX, DOI: <https://doi.org/10.478132782-2818-2022-2-4-0339-0349>