

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОПОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются аспекты, приводящие к более интенсивному перемешиванию газа, для наиболее полного сгорания образовавшейся турбулентной струи, которая используется в топочных процессах. Предмет исследования – модели нахождения наиболее оптимальной концентрации перемешивающихся газов. Целью работы является применение моделей определения концентраций перемешивающихся газов для автоматизированной системы управления топочным оборудованием.

Материалы и методы. Математическое моделирование с привлечением законов сохранения субстанций и химической аэротермодинамики, аналитическое и численное решение задач, вычислительный эксперимент.

Результаты. Была сформулирована задача о диффузионном горении двух газовоздушных смесей – симбиоза моделей диффузионного и гомогенного режимов горения в турбулентном потоке. Разработана модель определения концентраций для автоматизированной системы подачи компонентов для диффузионного горения смеси и определены границы теоретической и практической применимости предложенной модели.

Выводы. Рассмотренные технологии потенциально применимы в системе автоматизированного управления процессами горения и показана высокая оценка их эффективности.

Ключевые слова: анализ теплообмена, автоматизация, управление, газ, модель, примесь, оптимизация сжигания.

N. K. Yurkov, R. A. Shtykov

THE IMPROVEMENT OF CONTROL SYSTEM OF FURNACE EQUIPMENT BY USING THE NEW MATHEMATICAL MODEL OF GAS MIXING

Abstract.

Backgrounds. The object of the study is the aspects leading to more intensive mixing of the gas, for the most complete combustion of the formed turbulent jet, which is used in combustion processes. The subject of the study is the model for finding the most optimal concentration of mixing gases. The aim of the work is the use of models for determining the concentrations of stirring gases for an automated control system of furnace equipment.

Materials and methods. Mathematical modeling with the use of the laws of conservation of substances and chemical aerothermodynamics, analytical and numerical solution of problems, computational experiment.

Results. The problem of diffusion combustion of two gas-air mixtures was formulated - the symbiosis of models of diffusion and homogeneous combustion regimes in a turbulent flow. A concentration determination model was developed for an automated component supply system for diffusion combustion of a mixture, and the theoretical and practical applicability of the proposed model was determined.

Conclusions. The technologies considered are potentially applicable in the system of automated control of combustion processes and a high assessment of their effectiveness is shown.

Keywords: heat and mass transfer analysis, automation, control, gas, model, admixture, combustion optimization.

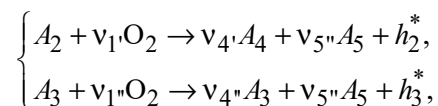
Введение

Как показывает практика, используемые в топочных процессах горючие газы имеют сложный состав, включающий несколько горючих, пассивных (с точки зрения химической реакции) компонентов и кислород. В составе воздуха имеются, хотя и в малом количестве, горючие элементы. К тому же, малая предварительная добавка горючего к воздуху и воздуха (кислорода) к горючему газу может служить хорошим подспорьем при управлении тепло- и массообменными процессами в турбулентных потоках.

Поэтому необходимо разработать методы сжигания для автоматизированной системы подачи газов, чтобы обеспечить малый коэффициент избытка и учесть рециркуляцию продуктов горения в процессе сжигания.

Описание метода решения задачи исследования

Пусть горючее в своем составе имеет два горючих компонента (A_2 и A_3), брутто-реакции горения которых имеют вид



где h_i^* – теплотворная способность i -го компонента (Дж кг^{-1}); ν_i и ν_k – стехиометрические коэффициенты реагентов и продуктов реакции двух продуктов горения A_4 и A_5 , а также химически пассивного газа A_6 . Окислитель имеет в своем составе кислород O_2 (A_1) и A_6 – химически пассивный газ. Поэтому граничные условия во входных сечениях имеют вид:

– верхняя граница:

$$C_i = \begin{cases} < C_i >_2 & \text{для } i = 2, 3, 4, 5 \text{ и } 6, \\ 0 & \text{для } i = 1; \end{cases}$$

– нижняя граница:

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{для } i = 2, 3, 4, 5, \\ < C_i >_1 & \text{для } i = 1 \text{ и } i = 6. \end{cases}$$

Уравнения переноса и сохранения масс компонентов имеют вид

$$L(C_i) = \omega_i \quad (i=1..6), \text{ притом } \omega_6 = 0,$$

где C_i – массовая концентрация i -го компонента газа в смеси (кг кг^{-1}); L – текущий расход газа; ω_i – массовая скорость образования/исчезновения i -го компонента газа ($\text{кг м}^{-3} \text{с}^{-1}$).

Определим концентрацию вводимых продуктов горения и инертных газов в зависимости от консервативной функции:

$$\begin{cases} C_4' = \langle C_4 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_4 \rangle_2 - \langle C_4 \rangle_1), \\ C_5' = \langle C_5 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_5 \rangle_2 - \langle C_5 \rangle_1), \\ C_6 = \langle C_6 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_6 \rangle_2 - \langle C_6 \rangle_1). \end{cases}$$

Остается разобраться в активных газах и продуктах горения, где можно использовать, в частности, положения, что часть кислорода

$$C_{1O} = \langle C_1 \rangle_1 - \sum_{i=2}^{N_\alpha+1} \text{ распределяется между горючими } C_{1O} = \sum_{i=2}^{N_\alpha+1} C_{1O,i}.$$

Тогда для каждого отдельно взятого горючего компонента, а также соответствующих им частей кислорода и образуемых продуктов горения, вводятся нормированные функции Шваба – Зельдовича $\tilde{C}_{1O,i}$, последние из которых эквивалентны как между собой, так и с функциями, введенными для инертных газов. Место фронта пламени, определяемое согласно модели Я. Б. Зельдовича [1], для каждого из горючих компонентов будет

$$\tilde{C}_{1O}^* = \frac{v_{i,1} m_i C_{1O,i}}{v_{i,1} m_i C_{1O,i} + v_{1,i} m_1 (1 - k_+) \langle C_i \rangle_2} \quad (i = 2..N_\alpha + 1).$$

Но в одной зоне смещения не могут быть несколько фронтов пламени, так как после первого же фронта пламени со стороны горючего доступ кислорода к другим горючим компонентам прекращается. Такое суждение приводит к зависимостям:

$$\tilde{C}_{2O}^* = \dots \tilde{C}_{(N_\alpha+1)O}^*.$$

Эти три системы линейных уравнений однозначно определяют нам неизвестные $\tilde{C}_{1O,i}$.

Полагаем, что исходный кислород в составе окислителя распределяется между горючими A_2 и A_3 : $\langle C_1 \rangle_1 = \langle C_{12} \rangle_1 + \langle C_{13} \rangle_1$, а концентрации некоторых компонентов состоят из трех частей:

$$C_i = C_i^O + C_i' + C_i'' \text{ при } i = 1, 4, 5,$$

где C_i^O – вводимые части; C_i' и C_i'' – соответствующие первой и второй горючим компонентам части концентраций.

Вводятся функции Шваба – Зельдовича для первого горючего:

$$\tilde{C}_2 = C_2 + \Omega_{24}' C_4', \quad \tilde{C}_1' = C_1' + \Omega_{1'4}' C_4', \quad \tilde{C}_5' = C_2 + \Omega_{25}' C_5'. \quad (1)$$

Подобным же образом для второго горючего имеем:

$$\tilde{C}_3 = C_3 + \Omega_{34}'' C_4'', \quad \tilde{C}_1'' = C_1'' + \Omega_{1''4}'' C_4'', \quad \tilde{C}_5'' = C_3 + \Omega_{35}'' C_5''.$$

Вводятся нормированные функции Шваба – Зельдовича:

$$\tilde{\tilde{C}}' = \frac{\tilde{z}_i' - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1} \quad \text{при } z_i' = C_2, C_1', C_5';$$

$$\tilde{\tilde{C}}'' = \frac{\tilde{z}_i'' - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i'' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1} \quad \text{при } z_i'' = C_3, C_1'', C_5''.$$

Исключив промежуточные функции, определяются концентрации компонентов в зоне горючего.

Для первого горючего:

$$\begin{cases} C_2 = (\langle C_2 \rangle_2 + \Omega_{24}' \langle C_1' \rangle_1) \tilde{\tilde{C}} - \Omega_{24}' \langle C_1' \rangle_1, \\ C_4' = \langle C_1' \rangle_1 \Omega_{4'1}' (1 - \tilde{\tilde{C}}), \quad C_5' = \langle C_1' \rangle_1 \Omega_{5'4}' (1 - \tilde{\tilde{C}}); \end{cases}$$

для второго горючего:

$$\begin{cases} C_3 = (\langle C_3 \rangle_2 + \Omega_{34}'' \langle C_1'' \rangle_1) \tilde{\tilde{C}} - \Omega_{34}'' \langle C_1'' \rangle_1, \\ C_4'' = \langle C_1'' \rangle_1 \Omega_{4''1}'' (1 - \tilde{\tilde{C}}), \quad C_5'' = \langle C_1'' \rangle_1 \Omega_{5''4}'' (1 - \tilde{\tilde{C}}). \end{cases}$$

Концентрации в зоне окислителя для первого горючего:

$$\begin{cases} C_1' = \langle C_1' \rangle_1 - (\langle C_1' \rangle_1 + \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{1'2}) \tilde{\tilde{C}}; \\ C_4' = \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{4'2} C, \quad C_5' = \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{5'2} \tilde{\tilde{C}}; \end{cases}$$

для второго горючего:

$$\begin{cases} C_1'' = \langle C_1'' \rangle_1 - (\langle C_1'' \rangle_1 + \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{1''3}) \tilde{\tilde{C}}; \\ C_4'' = \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{4''3} \tilde{\tilde{C}}; \quad C_5'' = \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{5''2} \tilde{\tilde{C}}. \end{cases}$$

Фронт пламени для этих горючих определяется в виде

$$\tilde{C}^* = \frac{1}{1 + \Omega_{21}' < C_2 >_2 / < C_1 >_1}, \quad (2)$$

$$\tilde{C}^{**} = \frac{1}{1 + \Omega_{31}'' < C_3 >_2 / < C_1 >_1}. \quad (3)$$

Так как фронт пламени для горючих компонентов единый, то значения (2) и (3) должны совпасть: $\tilde{C}^* = \tilde{C}^{**}$.

Отсюда определяются доли горючих компонентов, соответствующие исходной концентрации кислорода:

$$< C_1 >_1 = \frac{\Omega_{1'3} < C_1 >_1 < C_2 >_2}{\Omega_{1'2} < C_3 >_2 + \Omega_{1'3} < C_2 >_2}, \quad < C_1 >_1 = \frac{\Omega_{1'2} < C_1 >_1 < C_3 >_2}{\Omega_{1'2} < C_3 >_2 + \Omega_{1'3} < C_2 >_2},$$

поэтому

$$\tilde{C}^* = 1 / (1 + < C_3 >_2 \Omega_{31}'' + < C_2 >_2 \Omega_{21}')$$

и концентрации компонентов определяются в зоне горючего как:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = 0, \\ C_2 = (< C_2 >_2 + \Omega_{24}' < C_1 >_1) \tilde{C} - < C_1 >_1 \Omega_{24}', \\ C_3 = (< C_3 >_2 + < C_1 >_1 \Omega_{34}'') \tilde{C} - < C_1 >_1 \Omega_{34}'', \\ C_4 = (< C_1 >_1 \Omega_{4'1} + < C_1 >_1 \Omega_{4''1}) (1 - \tilde{C}) + < C_4 >_1 + (< C_4 >_2 - < C_4 >_1) \tilde{C}, \\ C_5 = (< C_1 >_1 \Omega_{5'4} + < C_1 >_1 \Omega_{5''4}) (1 - \tilde{C}) + < C_5 >_1 + (< C_5 >_2 - < C_5 >_1) \tilde{C}; \end{array} \right.$$

а в зоне окислителя:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = < C_1 >_1 - (< C_1 >_1 + < C_1 >_1 \Omega_{1'2} + < C_3 >_2 \Omega_{1''3}) \tilde{C}, \\ C_2 = 0, \quad C_3 = 0, \\ C_4 = (< C_2 >_2 \Omega_{4'2} + < C_3 >_2 \Omega_{4''3}) (1 - \tilde{C}) + < C_4 >_1 + (< C_4 >_2 - < C_4 >_1) \tilde{C}, \\ C_5 = (< C_2 >_2 \Omega_{5'2} + < C_3 >_2 \Omega_{5''3}) (1 - \tilde{C}) + < C_5 >_1 + (< C_5 >_2 - < C_5 >_1) \tilde{C}. \end{array} \right.$$

Массовая концентрация химически пассивного газа определяется единой формулой во всей области тепло- и массообмена:

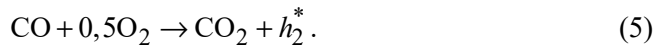
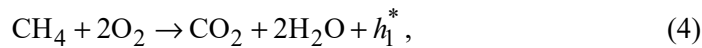
$$C_6 = < C_6 >_1 + (< C_6 >_2 - < C_6 >_1) \tilde{C}.$$

В пользу достоверности полученных выражений для концентраций компонентов можно привести следующие два факта. Во-первых, сумма массовых концентраций компонентов в каждой из зон (горючего и окислителя) равняется единице. Во-вторых, предполагается отсутствие одного из горючих компонентов в составе многокомпонентного горючего газа.

В качестве примера рассмотрено горение однородной смеси природного и доменного газов, вытекающих в бесконечное пространство покоящегося и спутного потока воздуха. Для простоты принимается, что природный газ состоит только из метана CH_4 ; доменный газ имеет массовый состав: 30 % – двуокись углерода CO , 10 % – углекислый газ CO_2 , 60 % – азот N_2 ; воздух имеет в составе один окислитель – кислород O_2 (23,2 %) и инертный газ – азот N_2 (76,8 %).

Через $C_{\text{П}}$ и $C_{\text{Д}}$ обозначены массовые доли природного и доменного газов в составе горючего, притом: $C_{\text{П}} + C_{\text{Д}} = 1$, т.е. горючее состоит только из природного и доменного газов.

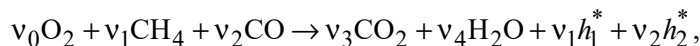
Каждое горючее имеет свое стехиометрическое уравнение:



В вычислениях за теплотворные способности приняты величины: для метана (h_1^*) – 11985 ккал/кг, а для двуокиси углерода (h_2^*) – 2450 ккал/кг.

Первоначальная концентрация кислорода $\langle C_{\text{O}} \rangle_1$ распределяется между метаном ($\langle C'_{\text{O}} \rangle_1$) и двуокиси углерода ($\langle C''_{\text{O}} \rangle_1$). Поэтому: $\langle C_{\text{O}} \rangle_1 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 + \langle C''_{\text{O}} \rangle_1$, где на основе описанного выше обобщения модели имеем $\langle C'_{\text{O}} \rangle_1 = \frac{\langle C_1 \rangle_1 \langle C_{\text{O}} \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_2 + \langle C_2 \rangle_2 / 7}$.

Умножив уравнение (4) на $\langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / (v_{\text{O}1} \langle C_{\text{O}} \rangle_1)$, а (5) – на $\langle C''_{\text{O}} \rangle_1 / (v_{\text{O}2} \langle C_{\text{O}} \rangle_1)$ и складывая полученные равенства, придем к единому стехиометрическому уравнению для двух горючих компонентов:



где

$$v_0 = 1, \quad v_1 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / (2 \langle C_{\text{O}} \rangle_1), \quad v_2 = 2(1 - \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1),$$

$$v_3 = 2(1 - 0,75 \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1), \quad v_4 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1.$$

Согласно положениям обобщенной модели вместо N уравнений переноса и сохранения i -го компонента (для реагентов) получим единое уравнение

ниже $L(\tilde{C}) = 0$ с граничными условиями во входном сечении:

$$\langle \tilde{C} \rangle_1 = 0, \quad \langle \tilde{C} \rangle_2 = 1.$$

При диффузионном горении, как отмечено выше, максимальная температура имеет место на фронте пламени. При умеренных скоростях потока температура на фронте пламени остается одинаковой. С математической точки зрения этот факт достигается тогда, когда уравнения относительно \bar{C} и \bar{H} (относительно-избыточная полная энтальпия газовой смеси) становятся эквивалентными. Учитывая условия $Le \approx 1$ и $M \approx 0$, можно вычислить значения концентраций продуктов горения и химически пассивных газов, и температуры смеси на фронте пламени, не решая системы уравнений тепло- и массообмена в целом.

На рис. 1 приведены значения температуры на фронте пламени для различных значений T_1 и T_2 в виде функции от C_{II} . При массовом соотношении метана и доменного газа 1:1 температура на фронте пламени понижается не более чем на 50 °С, по сравнению со сгоранием чистого метана, и экономится более 7 % природного газа. Если доля природного газа в горючей смеси составляет 20 % от общей массы, то температура факела снижается на 100 °С и экономия основного топлива составляет 20 %. Наряду с этим достигается социальный эффект, выражающийся в уменьшении объема вредных выбросов в атмосферу.

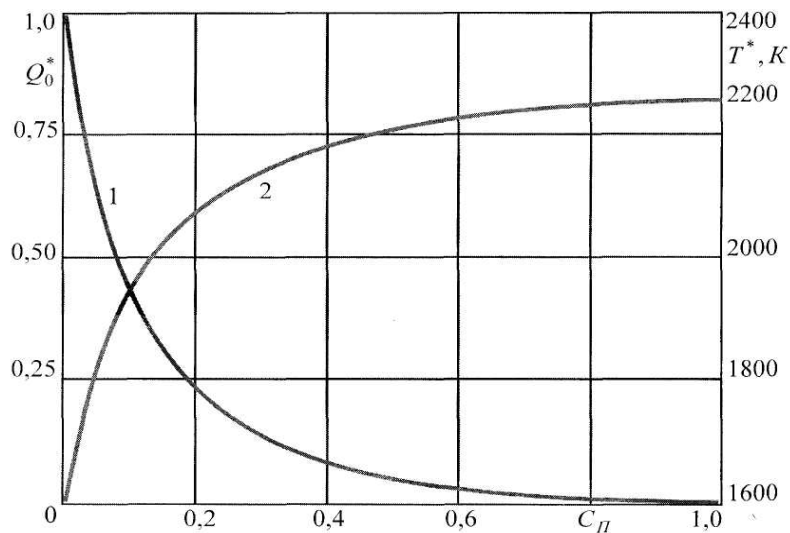


Рис. 1. Изменения доли доменного газа в теплоте сгорания (1) и температуры факела при $T_1 = T_2 = 300$ К (2) в зависимости от массовой доли метана в смеси метан + доменный газ, где T – температура (К) газовой смеси

Вернемся к более полной постановке решаемой задачи, которая формулируется в следующем виде. Одиночная струя горючего газа распространяется в затопленном воздухе неограниченном пространстве (рис. 2). В плоской постановке горючее истекает из бесконечной щели, образованной двумя параллельными плоскостями. Расстояние между плоскостями $2a$.

Изменением давления в расчетной области пренебрегается, что соответствует вполне расширенной струе. Не учитываются также сила тяжести и

излучение. Скорость потока – дозвуковая, а во входном сечении – кусочно-однородная. В качестве масштабных параметров выбираются a, u_2, T_1, ρ_1, H_1 .

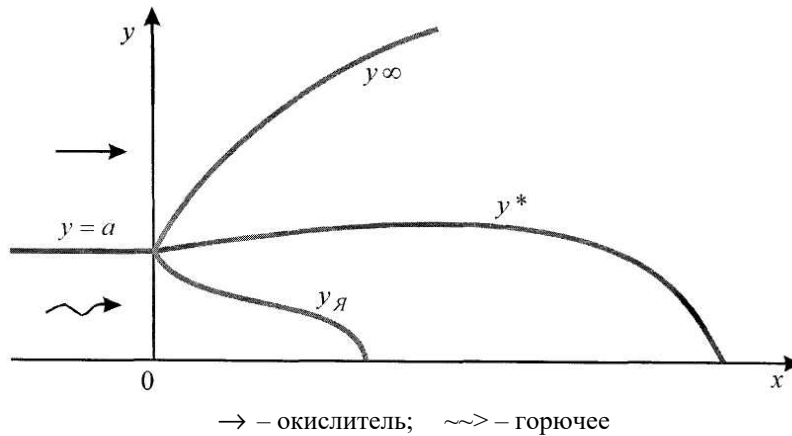


Рис. 2. Характерные линии одиночного струйного течения с факелом в осевом сечении Ox – плоскость/ось симметрии; $y_я$ – граница ядра струи; y^* – фронт пламени; $y_\infty = b(x)$ – условная граница струи

Процесс тепломассообмена описывается уравнениями турбулентных струйных течений многокомпонентного реагирующего газа [2] при равенстве единице значения коэффициента Льюиса ($Le=1$) и умеренных скоростях ($M \ll 1$) в плоской ($n=0$) постановке задачи.

Система замыкается обезразмеренным уравнением Менделеева – Клапейрона [2–5]:

$$\bar{\rho} = m / \langle m \rangle_1 \bar{T} \quad (p = \text{const}), \quad (6)$$

где ρ – плотность (кг м^{-3}) газовой смеси; T – температура (К) газовой смеси; p – гидростатическое давление (Па); $m = \left(\sum_{i=1}^N m_i / c_i \right)$; m_i – молярные массы газовой смеси и i -го компонента газа (кг моль^{-1}).

Выражением для температуры

$$\bar{T} = \frac{C_p l}{C_p} \left(\tilde{H} (H_2 - 1) - C_1 h_1^* - C_2 h_2^* \right), \quad (7)$$

где $c_p = \sum_{i=1}^N c_{pi} C_i$ и c_{pi} – теплоемкости газовой смеси и i -го компонента при постоянном давлении ($\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$); $H = c_p T + \frac{U^2}{2} + \sum_{i=1}^N c_i h_i^*$ – полная эн-

тальпия газовой смеси (Дж кг^{-1}), которое вытекает из безразмерного выражения полной энтальпии, определяется выражением для коэффициента турбулентной вязкости [2–5].

Здесь и далее

$$\tilde{H} = (H - H_1) / (H_2 - H_1). \quad (8)$$

Граничными условиями служат:

$$\xi = 0: \begin{cases} \bar{u} = \tilde{H} = \tilde{C} = 1 & \text{при } 0 \leq \bar{\psi} \leq \bar{\psi}_1, \\ \bar{u} = \tilde{H} = \tilde{C} = 0 & \text{при } \bar{\psi}_1 < \bar{\psi} < \bar{\psi}_\infty; \end{cases} \quad (9)$$

$$\xi > 0: \begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \bar{\psi}} = 0 & \text{при } \bar{\psi} = 0, \\ \bar{u} \rightarrow 0, \tilde{H} \rightarrow 0, \tilde{C} \rightarrow 0 & \text{при } \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}_\infty, \end{cases}$$

где значения функции тока $\bar{\psi}$, $\bar{\psi}_1$, $\bar{\psi}_\infty$ вычисляются (согласно значению $n = 0$) по формулам:

$$\rho u y^n = \psi^n \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \rho v y^n = -\psi^n \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

где y – поперечная (радиальная) координата, в частности, геодезическая отметка (нивелирная высота) оси трубы в точке x (м); ε – кинематический коэффициент турбулентной вязкости или коэффициент турбулентного обмена ($\text{м}^2 \text{с}^{-1}$); ψ – функция тока.

Для решения полученной системы с соответствующими граничными условиями привлекаются неявная схема аппроксимации и итерационный процесс. Решение протекает по маршевому методу по оси $O\bar{\xi}$.

Достоверность полученных численных результатов проверялась с помощью интегралов сохранения импульса и относительно-избыточной энтальпии вдоль свободной струи, которые в плоскопараллельном случае выглядят в безразмерных физических координатах следующим образом:

$$\int_0^{y+\infty} \bar{\rho} \bar{u}^2 d\bar{y} = \text{const}, \quad (10)$$

$$\int_0^{y+\infty} \tilde{H} \bar{\rho} \bar{u} d\bar{y} = \text{const}. \quad (11)$$

Интенсивность горения проверялась с помощью вновь введенной функции кривой выгорания для двух горючих компонентов:

$$g(\chi\bar{x}) = \frac{I(0) - I(\chi\bar{x})}{I(0)},$$

где $I(\chi\bar{x}) = \int_0^{y+\infty} (C_1 h_1^* + C_2 h_2^*) \bar{\rho} \bar{u} d\bar{y}$.

При отсутствии одного из горючих компонентов ($\langle C_1 \rangle_2 = 0$ или $\langle C_2 \rangle_2 = 0$) эта функция превращается в обычную кривую выгорания для одного горючего компонента.

Проведены расчеты распространения смеси доменного и природного газов при значениях массовой концентрации природного газа $C_{II} = 0; 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,00$ при температуре горючего $T_2 = 500$ К, воздуха – $T_1 = 300$ К. Турбулентные числа Прандтля и Шмидта принимались равными $0,75$. Получены типичные для струйного течения профили продольной скорости, плотности и температуры. Некоторые из этих результатов представлены в виде графиков на рис. 3–7.

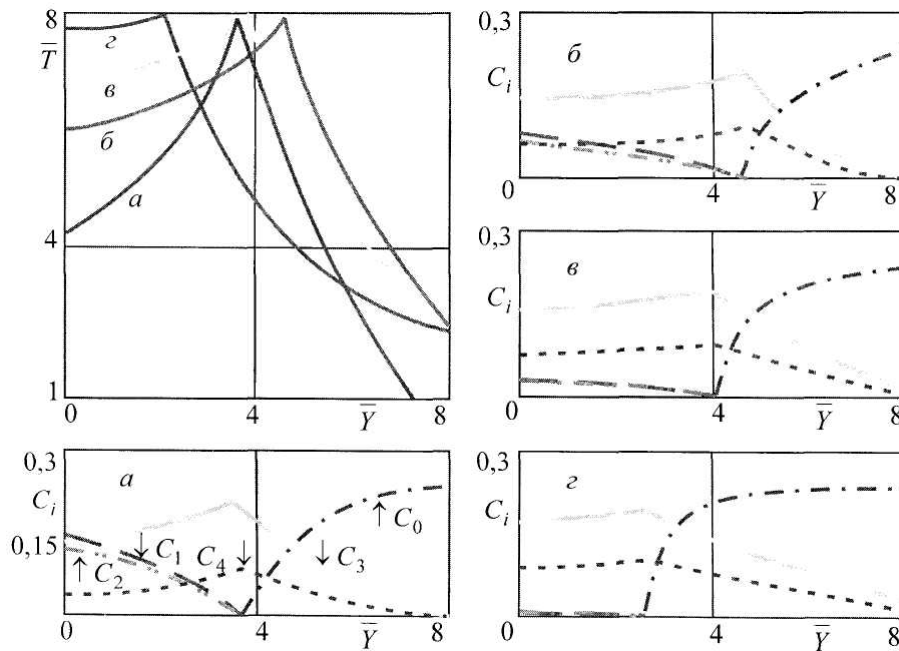


Рис. 3. Профили температуры и концентраций в плоской струе при сгорании смеси метана ($C_{II} = 0,25$) и доменного газа

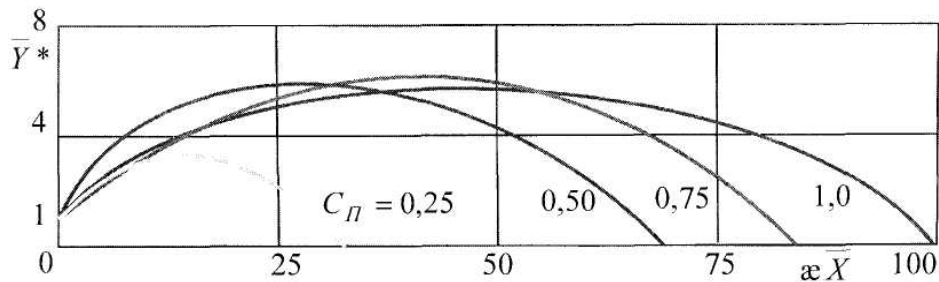


Рис. 4. Фронты пламени в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

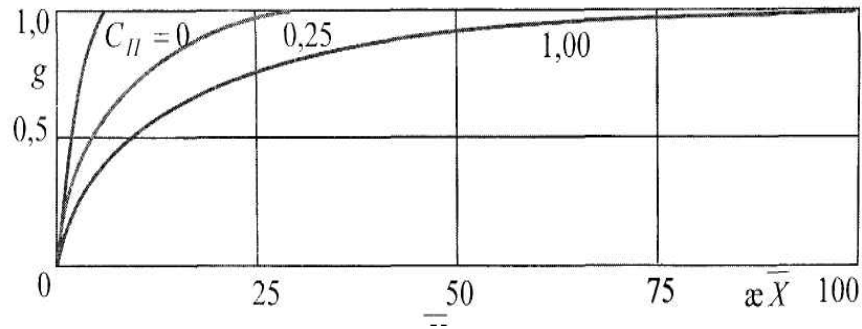


Рис. 5. Кривые выгорания $g(\chi\bar{x})$ в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

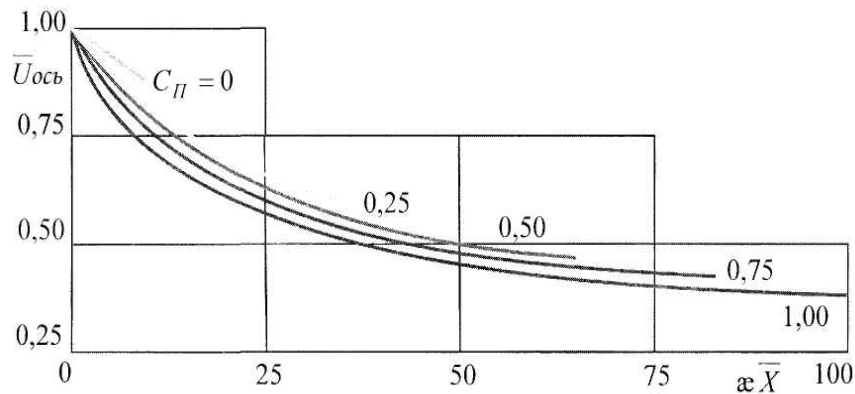


Рис. 6. Осевые значения скорости в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

На рис. 3 приведены профили температуры и массовых концентраций (кроме химически пассивного газа) в различных сечениях при $C_{II} = 0,25$, а на рис. 4 – формы фронтов пламени для $C_{II} = 0; 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,00$.

Обозначения a , b , v и z соответствуют сечениям $\chi\bar{x} = 4,62; 10,9; 17,9; 25,5$.

Как известно, при изотермическом распространении данной смеси в воздухе с увеличением C_{II} импульс потока уменьшается, а граница потока усиленно расширяется. Последний фактор должен был способствовать интенсивному перемешиванию и горению. Но при наличии химического взаимодействия этот фактор не оказался определяющим для длины фронта пламени. Удлинение фронта пламени с увеличением C_{II} , по нашему мнению, можно объяснить насыщенностью горючей смеси метаном. Как видно из стехиометрических соотношений, для окисления (сгорания) одной молекулы двуокиси углерода достаточно полмолекулы кислорода, в то время как для метана требуются две молекулы. Благодаря этому фронт пламени при сгорании метана получается в 15 раз длиннее, чем при сгорании доменного газа (если предположить, что доменный газ горит в воздухе). Из-за этой несоразмерности форма фронта пламени для $C_{II} = 0$ на рис. 4 не приведена.

На рис. 5 изображены кривые выгорания для $C_{\Pi} = 0; 0,25; 0,50$ и $1,00$. Формы фронтов пламени этих кривых типичны для затопленных струй с диффузионным пламенем, т.е. основная часть горючего вступает в реакцию в непосредственно близкой к срезу сопла области течения.

Изменения осевого значения продольной составляющей скорости вдоль течения при различных значениях C_{Π} представлены на рис. 6. Большие отклонения осевых значений скорости заметны на близких к срезу сопла участках. А в дальнейшем они приближаются друг к другу.

Заключение

В статье рассматриваются аспекты, приводящие к более интенсивному перемешиванию газа, для наиболее полного сгорания образовавшейся турбулентной струи, которая используется в топочных процессах. Исходя из насущных интересов газопользующих отраслей производства и теории турбулентных течений газов, выражающихся в экономии основных ресурсов топлива и учете многокомпонентности горючего и окислителя была сформулирована задача о диффузионном горении двух газозвудушных смесей – симбиоза моделей диффузионного и гомогенного режимов горения в турбулентном потоке. Разработана модель определения концентраций для автоматизированной системы подачи компонентов для диффузионного горения смеси и определены границы теоретической и практической применимости предложенной модели. Адекватность предложенной модели решения диффузионной задачи доказана: суммированием концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя; стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени; сопоставлением численных результатов с экспериментальными и теоретическими данными по сжиганию смеси в воздухе.

Так как 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. Правильно подобранная концентрация горючего меняет характеристики природного газа, что и влияет на процессы тепло- и массообмена при его сжигании с образованием минимального количества балласта. Для решения данной задачи и были разработаны методы в рамках диффузионного горения смеси с одним и многими горючими компонентами и определены границы теоретической и практической применимости предложенных способов. При этом показано, что при замене половины природного газа (по массе) доменным газом температура на факеле снижается на ≈ 50 °С, факел укорачивается на 3/10 часть и экономия топлива горючего составляет более 7 %.

Библиографический список

1. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др. ; под ред. Г. Н. Абрамовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1984. – 716 с.
2. **Лапин, Ю. В.** Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа / Ю. В. Лапин. – Москва : Наука, 1982. – 312 с.
3. **Гостинцев, Ю. А.** Турбулентные струйные течения в страфицированной атмосфере : препринт : в 2 ч. / Ю. А. Гостинцев, О. О. Едгоров, Р. А. Файзиев. – Черногловка , Изд. ИХФ АН СССР, 1989. – Ч. 1. – 87 с.; 1990. – Ч. 2. – 98 с.

4. Методы расчета турбулентных течений : пер. с англ. / под ред. В. Кольмана. – Москва : Мир, 1984. – 464 с.
5. Турбулентные течения реагирующих газов / под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. – Москва : Мир, 1983. – 328 с.

References

1. Abramovich G. N., Girshovich T. A., Krashennnikov S. Yu. et al. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of turbulent jets]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Nauka, 1984, 716 p. [In Russian]
2. Lapin Yu. V. *Turbulentnyy pogranchnyy sloy v sverkhzvukovykh potokakh gaza* [Turbulent boundary layer in supersonic gas flows]. Moscow: Nauka, 1982, 312 p. [In Russian]
3. Gostintsev YU. A., Yodgorov O. O., Fayziyev R. A. *Turbulentnyye struynnye techeniya v stratifitsirovannoy atmosfere: preprint v 2-kh ch.* [Turbulent jet flows in a stratified atmosphere: preprint in 2 parts]. Chernogolovka: Izd. IKHF AN SSSR, 1989, part 1, 87 p. (1990, part 2, 98 p.) [In Russian]
4. *Metody rascheta turbulentnykh techeniy: per. s angl.* [Methods for calculating turbulent flows: translated from English]. Ed. V. Kol'man. Moscow: Mir, 1984, 464 p. [In Russian]
5. *Turbulentnyye techeniya reagiruyushchikh gazov* [Turbulent flows of reacting gases]. Eds. P. Libbi, F. Vil'yams. Moscow: Mir, 1983, 328 p. [In Russian]

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor, head of the sub-department of radio equipment design and production, Penza State University (40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент, кафедра физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, 23)

E-mail: fpm@mivlgu.ru

Shtykov Roman Aleksandrovich

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of physics and applied mathematics, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (23, Orlovskaya street, Murom, Vladimir region, Russia)

Образец цитирования:

Юрков, Н. К. Совершенствование системы управления топочным оборудованием за счет использования новой математической модели смешивания газов / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 90–102. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-9.