

Штыков Р.А.  
 ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет  
 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40  
 e-mail: ipmrroman@yandex.ru

### Разработка моделей, алгоритмов и программ расчета автоматизированной системы управления транспортировки и точного диффузионного горения

Актуальность проблемы.

1) Открытое сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) приводит:  
 - к ущербу окружающей среды,  
 - наносит вред здоровью населения,  
 - так же страдает экономика страны, так как химическое сырье и энергетический ресурс просто выбрасываются на ветер.

2) Принято правительственное решение о сроке доведения уровня использования ПНГ до 95% с 2012 г. (Постановление Правительства РФ от 8 января 2009 No7). При несоблюдения применяется дополнительный повышающий коэффициент к штрафам.

Непосредственное сжигание попутного газа ни в одиночной струе, ни в виде смеси (заранее перемешанной с воздухом) не удастся. Остается прибегнуть к составным струям, для этого необходимы новые модели смешивания газов.

3) Общим недостатком всех способов горения является необходимость введения конструктивных изменений топки.

4) При практических расчетах параметров транспортировки газа по трубопроводам учитывается перепад давления, вызванный только сопротивлением трения. Так как из-за малой плотности газа пренебрегают его инерцией и силой гравитации, что приводит к неточностям в расчетах существующих методик.

Цели работы.

1) Разработка алгоритмов для проведения вычислительных экспериментов в задачах горения и транспортировки путем использования последовательно усложняющихся моделей течений горения на основе применения современных численных схем и методов.

2) Создание на основе этих алгоритмов программных комплексов, позволяющих проводить численные исследования в рамках созданных моделей горения и транспортировки газа.

Задачи исследования.

1) Разработка математической модели диффузионного горения горючих смесей, в составы которых входят два и более горючих компонента, а также газоздушных смесей.

2) Разработка математической модели тепло – массообмена при наличии дополнительной струи химически попутного газа и рециркуляции продуктов горения.

3) Создание алгоритмов исследование особенностей одиночных и составных струй с диффузионными факелами многокомпонентных смесей в рамках теории турбулентного пограничного слоя.

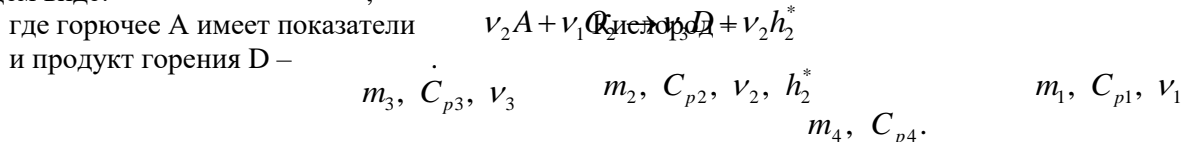
4) Создание отказоустойчивых программных комплексов систем управления, позволяющих автоматизировать проведение экспериментальных исследований по моделированию различных процессов диффузионного горения составного газа.

Разработка модели диффузионного горения.

За основу модели диффузионного горения взята модель Шваба-Зельдовича . Новая модели диффузионного горения должна учитывать каждый химический элемент в ходе решения диффузионной задачи о сохранении и переносе масс и признающих наличие единого фронта для всех горючих компонентов [1].

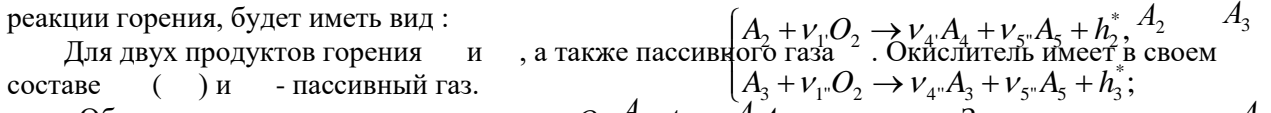
1. В составах, вводимых в зону интенсивного тепло - и массообмена, имеются 1) горючий газ, 2) кислород, 3) химически пассивный газ и 4) продукт горения.

2. Химическое взаимодействие описывается простым выражением брутто-реакции в общем виде:



Химически пассивный газ имеет показатели -

Если горючее в своем составе имеет два горючих компонента ( и ), брутто-реакции горения, будет иметь вид :



Область течения мысленно разделим на зоны горючего и окислителя. Зона горючего ограничивается входным сечением горючего  $\bar{X}_{+0}$ , фронтом пламени  $\bar{X}_*$  и границей течения  $\bar{X}_+$ . Зона окислителя имеет границы в виде входного сечения  $\bar{X}_{-0}$ , фронта пламени  $\bar{X}_*$  и границы течения  $\bar{X}_-$ .

Граничные условия для уравнений сохранения масс компонентов во входном сечении задаются в виде [2]:

Уравнения переноса и сохранения масс компонентов имеют вид:

$$\begin{cases} \langle C_i \rangle_2 \bar{X} = \bar{X}^0 & \text{для } i=2,3,4,5 \\ \langle C_i \rangle_2 & \text{при } \bar{X} \in \bar{X}_{-0}, \\ \langle C_i \rangle_2 & \text{при } \bar{X} \in \bar{X}_{+0} \end{cases} \quad \bar{X} = \bar{X}^0 \text{ для } i=2,3,4,5,$$

Уравнения переноса относительно этих переменных взаимно эквивалентны в отдельно взятых зонах:

(1) 
$$\frac{C_2}{\langle C_2 \rangle_2} = \frac{\langle C_2 \rangle_2}{\langle C_2 \rangle_2} = const \quad \text{при } \bar{X} \in [\bar{X}_*, \bar{X}_*]$$

Массовых концентраций в зоне горючего:

(2) 
$$\begin{cases} C_1 = \langle C_1 \rangle_2 = \frac{S}{\langle C_1 \rangle_2 - \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{21}}, & C_2 = \langle C_2 \rangle_2 = \frac{S}{\langle C_1 \rangle_2 - \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{21}}, \\ \langle C_3 \rangle_2 = \frac{\langle C_2 \rangle_2 - \langle C_1 \rangle_2 \langle C_2 \rangle_1}{\Omega_{31} \langle C_2 \rangle_2 - \Omega_{32} \langle C_1 \rangle_2} (1 - C) \end{cases}$$

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

Полагаем, что исходный окислитель между горючими  $A_2$  и  $A_3$

$$\begin{cases} C_4 = \langle C_4 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_4 \rangle_2 - \langle C_4 \rangle_1), \\ C_5 = \langle C_5 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_5 \rangle_2 - \langle C_5 \rangle_1), \\ C_6 = \langle C_6 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_6 \rangle_2 - \langle C_6 \rangle_1). \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{кислород в составе} \\ \text{распределяется} \\ A_3 \end{array}$$

$\langle C_1 \rangle_1 = \langle C_{12} \rangle_1 + \langle C_{13} \rangle_1$ , а концентрации некоторых компонентов состоят из трех

частей  $C_i = C_i^0 + C_i' + C_i''$  при  $i=1,4,5$ ,

где  $C_i^0$  - вводимые части,  $C_i'$  и  $C_i''$  - соответствующие первой и второй горючим компонентам части концентраций.

Вводятся функции Шваба-Зельдовича для первого горючего:

$$\tilde{C}_2 = C_2 + \Omega_{24} C_4, \quad \tilde{C}_1 = C_1 + \Omega_{14} C_4, \quad \tilde{C}_5 = C_2 + \Omega_{25} C_5.$$

Подобным же образом для второго горючего имеем:

$$\tilde{C}_3 = C_3 + \Omega_{34} C_4, \quad \tilde{C}_1 = C_1 + \Omega_{14} C_4, \quad \tilde{C}_5 = C_3 + \Omega_{35} C_5.$$

Вводятся нормированные функции Шваба-Зельдовича:

$$\tilde{C}' = \frac{\tilde{z}_i' - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1} \quad \tilde{C}'' = \frac{\tilde{z}_i'' - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i'' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1}$$

Исключив промежуточные функции, определяются концентрации компонентов в зоне горючего.

Получим для первого горючего:  $z_i = C_2, C_1', C_5' \quad z_i'' = C_3, C_1'', C_5''$

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

для второго горючего:

$$\begin{cases} C_3 = (\langle C_3 \rangle_2 + \Omega_{34''} \langle C_1 \rangle_1) \tilde{C} - \Omega_{24'} \langle C_1 \rangle_1 \\ C_4'' = \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{4''1''} (1 - \tilde{C}), \quad C_5'' = \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{5''4''} (1 - \tilde{C}). \end{cases}$$

Концентрации в зоне окислителя для первого горючего:

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

для второго горючего:

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

Местоположение фронта пламени определяется:

$$\tilde{C}^* = \frac{1 - \Omega_{21} \frac{\langle C_2 \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_1}}{1 + \Omega_{21} \frac{\langle C_2 \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_1} + \Omega_{31} \frac{\langle C_3 \rangle_2}{\langle C_1 \rangle_1} + \Omega_{41} \frac{\langle C_4 \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_1} + \Omega_{51} \frac{\langle C_5 \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_1}}$$

Отсюда определяются доли горючих компонентов, соответствующие исходной концентрации кислорода:

$$\langle C_1 \rangle_1 = \frac{\Omega_{1'3} \langle C_1 \rangle_1 \langle C_2 \rangle_2}{\Omega_{1'2} \langle C_3 \rangle_2 + \Omega_{1'3} \langle C_2 \rangle_2} \quad \langle C_1 \rangle_1 = \frac{\Omega_{1'2} \langle C_1 \rangle_1 \langle C_3 \rangle_2}{\Omega_{1'2} \langle C_3 \rangle_2 + \Omega_{1'3} \langle C_2 \rangle_2}$$

Поэтому концентрации компонентов определяются в зоне горючего как:

$$\begin{cases} C_1 = 0, \\ C_2 = (\langle C_2 \rangle_2 + \Omega_{24'} \langle C_1 \rangle_1) \tilde{C} - \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{24'}, \\ C_3 = (\langle C_3 \rangle_2 + \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{34''}) \tilde{C} - \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{34''}, \\ C_4' = (\langle C_1 \rangle_1 \Omega_{4'1'} + \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{4''1''}) (1 - \tilde{C}) + \langle C_4 \rangle_1 + (\langle C_4 \rangle_2 - \langle C_4 \rangle_1) \tilde{C}, \\ C_1 = \langle C_1 \rangle_1 - (\langle C_1 \rangle_1 + \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{1'2} + \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{1''3}) \tilde{C}, \\ C_5' = (\langle C_1 \rangle_1 \Omega_{5'4'} + \langle C_1 \rangle_1 \Omega_{5''4''}) (1 - \tilde{C}) + \langle C_5 \rangle_1 + (\langle C_5 \rangle_2 - \langle C_5 \rangle_1) \tilde{C}; \end{cases}$$

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

$$C_4 = (\langle C_2 \rangle_2 \Omega_{4'2} + \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{4''3}) (1 - \tilde{C}) + \langle C_4 \rangle_1 + (\langle C_4 \rangle_2 - \langle C_4 \rangle_1) \tilde{C},$$

$$C_5 = (\langle C_2 \rangle_2 \Omega_{5'2} + \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{5''3}) (1 - \tilde{C}) + \langle C_5 \rangle_1 + (\langle C_5 \rangle_2 - \langle C_5 \rangle_1) \tilde{C}.$$

1) В условиях (2), то есть эквивалентности решений  $C_1 / \langle C_1 \rangle_1$  и  $C_2 / \langle C_2 \rangle_2$  в отдельных зонах горючего и окислителя.

2) В выражении (3). Т.к. в составе окислителя должен преобладать кислород (по сравнению со стехиометрическим составом), то числитель выражения для  $C^*$  должен быть положительным: Для того чтобы значение нормированной функции  $C^*$  соответствующее фронту пламени, находилось в области  $[0; 1]$  требуется выполнение условия:

$$C^* < C_2 >_2 - \Omega_{12} < C_1 >_2 > 0 \quad < C_1 >_1 - \Omega_{21} < C_2 >_1 > 0$$

**Литература**

1. 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. - № 1. - С.163-165.
2. Штыков Р.А. Построение стехиометрического уравнения для двух сложносоставных газоздушных смесей. / Р.А. Штыков // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2014. - №5. - С.78-81.