

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫСОТЫ ФАКЕЛА ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ГОРЕНИИ ЖИДКОСТИ

С. В. Пузач¹, В. Г. Пузач², Е. С. Абакумов¹

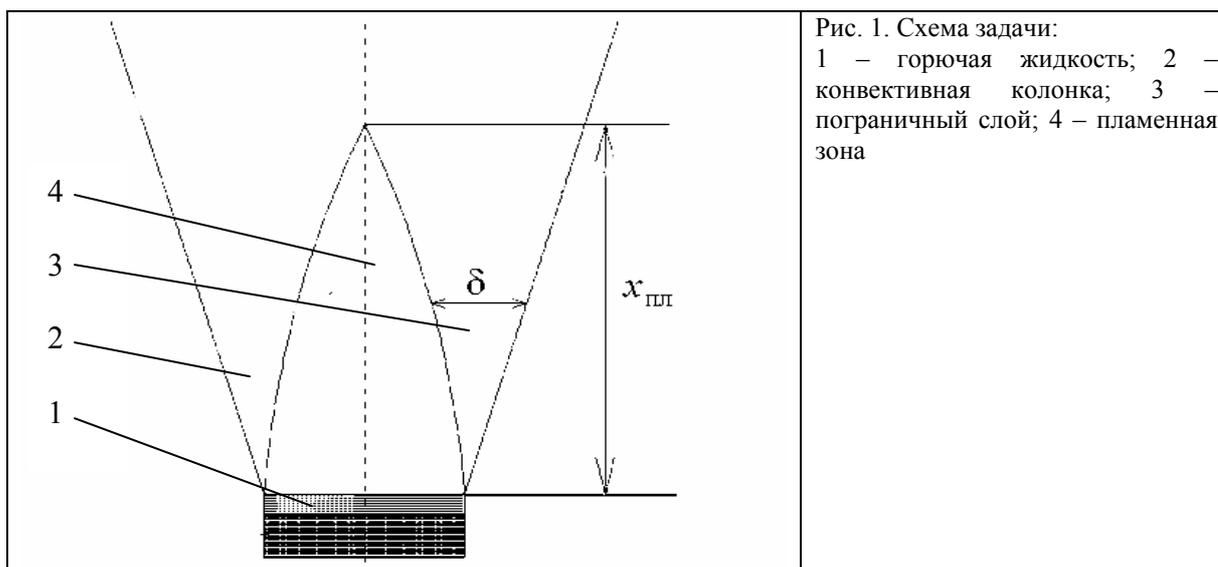
¹Академия государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Высота пламенной зоны является важным параметром, знание которого необходимо при решении большого круга задач пожарной безопасности. Сравнение существующих эмпирических формул расчета высоты диффузионного пламени с экспериментальными данными показывает, что при больших мощностях тепловыделения теоретическая высота может превышать экспериментальное значение в несколько раз [1, 2].

В работе [2] для ламинарных и турбулентных режимов горения предварительно перемешанных с окислителем горючих газов предложена теоретическая модель, качественно и количественно согласующаяся с экспериментальными данными. В данной работе предложена математическая модель расчета высоты факела при диффузионном горении жидкости.

На рис. 1 представлена схема задачи.



Принимаем, что пламенная зона заканчивается в точке, в которой условно смыкается концентрационный (по кислороду) пограничный слой (рис. 1).

В первом приближении при расчете параметров пограничных слоев вводим следующие допущения:

- пограничный слой является турбулентным;
- выполняется тройная аналогия Рейнольдса;
- пограничные слои являются плоскопараллельными (влиянием кривизны условной поверхности конвективной колонки пренебрегаем).

В зонном методе расчета динамики опасных факторов пожара [3] учет формы конвективной колонки осуществляется через величину условного угла полураскрытия

колонки. Угол полураскрытия, в первую очередь, определяется мощностью тепловыделения, связанной с высотой диффузионного факела.

При использовании полуэмпирического метода [3] массовый расход по сечению конвективной колонки находится из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{dG}{dx} = \frac{Bx(r + x \operatorname{tg} \gamma)^4}{T_a A G (G T_a + Bx)} + \frac{2G \operatorname{tg} \gamma}{r + x \operatorname{tg} \gamma} - \frac{B}{T_a} \left(1 - \frac{2x \operatorname{tg} \gamma}{r + x \operatorname{tg} \gamma} \right). \quad (1)$$

где $A = \frac{T_a R^2}{g p_a^2 \pi^2}$ – размерный параметр, $\text{с}^2 \cdot \text{м}^5 / (\text{кг}^2 \cdot \text{К})$; $B = \frac{Q_{\text{пож}}(1 - \chi)}{x_{\text{пл}} c_p}$ – размерный

параметр, $\text{кг} \cdot \text{К} / (\text{м} \cdot \text{с})$;

Интегральное уравнение импульсов для плоского пограничного слоя имеет вид [4]:

$$\frac{d \operatorname{Re}^{**}}{dx} = \frac{c_f}{2} \operatorname{Re}_L. \quad (2)$$

Коэффициент трения в уравнении (2) равен [4]:

$$c_f = c_{f0} \Psi_{\Sigma},$$

где $c_{f0} = B / \operatorname{Re}^{**m}$ – коэффициент трения в «эталонном» пограничном слое [4]; $B = 0,0256$; $m = 0,25$.

Относительный закон трения определяется как [4]:

$$\Psi_{\Sigma} = \Psi_T \Psi_{\varepsilon}.$$

Уравнение неразрывности для поперечного сечения конвективной колонки:

$$G = \rho_0 w_0 F. \quad (3)$$

Температура на внешней границе пограничного слоя равна [5]:

$$T_0 = T_a + \frac{Q_{\text{пож}}(1 - \chi)}{c_p G}.$$

Площадь поперечного сечения конической конвективной колонки равна:

$$F = \pi(r + x \operatorname{tg} \gamma)^2.$$

Граничное условие (при $x = 0$) к уравнению (2) имеет вид: $\operatorname{Re}^{**} = 10^{-6}$.

Параметры на внешней границе пограничного слоя (ρ_0 , w_0 , T_0 и др.) определяются с использованием выражения (3), в котором массовый расход находится из решения дифференциального уравнения (1).

Уравнения (1) и (2) решаются численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Закрытая система уравнений решается до тех пор, пока толщина динамического (а в соответствии с аналогией Рейнольдса также и концентрационного по кислороду пограничного слоя) пограничного слоя будет равна радиусу поперечного сечения конвективной колонки:

$$\delta = r + x \operatorname{tg} \gamma. \quad (4)$$

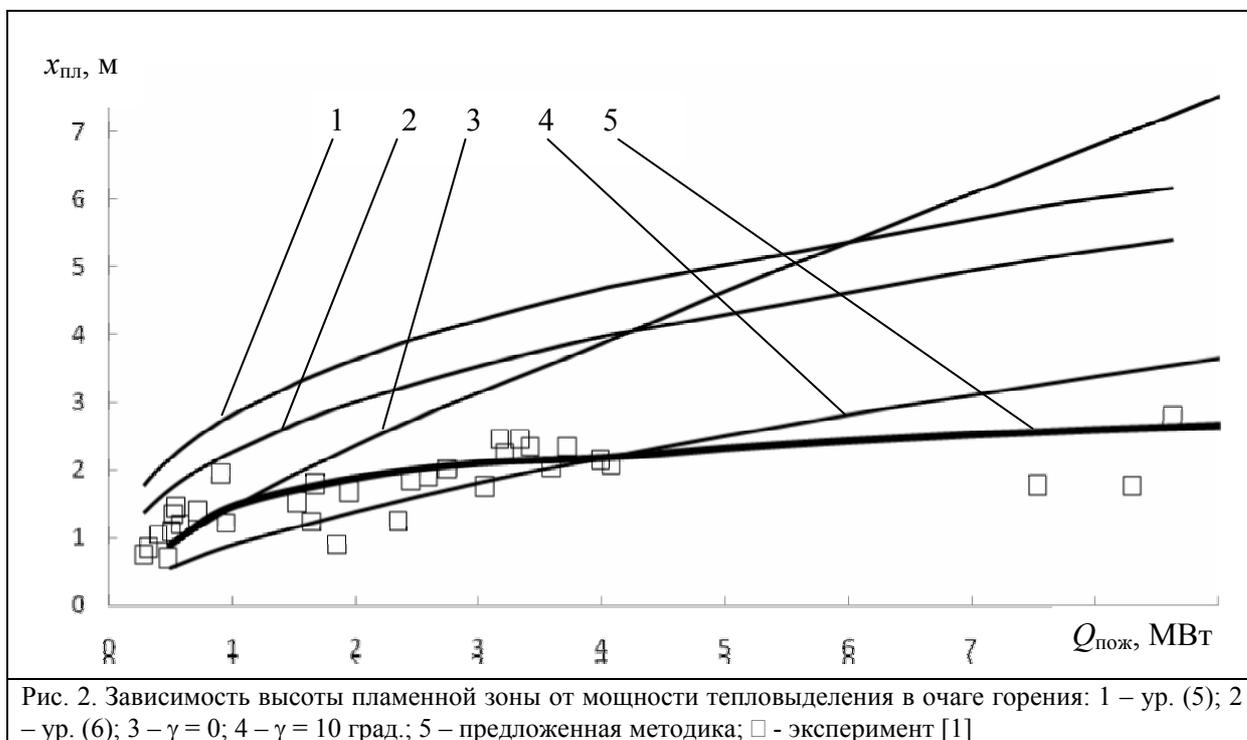
Величина x , при которой выполняется условие (4), будет являться искомой высотой факела $x_{\text{пл}}$.

Рассматриваются следующие эмпирические формулы для расчета высоты факела, приведенные в литературных источниках (выражения Heskestad и Thomas [1]):

$$x_{\text{пл}} = 0,235 \left(\frac{Q_{\text{пож}}}{1000} \right)^{2/5} - 2,04r, \quad (5)$$

$$x_{пл} = 84r \left(\frac{\psi}{\rho_a \sqrt{2gr}} \right)^{0,61} . \quad (6)$$

Выполнены численные эксперименты при горении авиационного керосина. Расчетные и экспериментальные [1] зависимости высоты пламенной зоны от мощности тепловыделения в очаге горения представлены на рис. 2.



Из рис. 2 видно, что удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными наблюдается:

- $\gamma = 0$ (кривая 3): при $Q_{пож} < 1,2$ МВт;
- $\gamma = 10$ град. (кривая 4): в диапазоне $1,8 \text{ МВт} < Q_{пож} < 4,0$ МВт;
- формула (6) (кривая 2): при $Q_{пож} < 0,9$ МВт.

Расчет с использованием формулы (5) (кривая 1) существенно завышает величину высоты пламени во всем диапазоне мощностей тепловыделения.

Зависимости угла полураскрытия конвективной колонки от мощности тепловыделения в очаге горения, при использовании которой в уравнении (1) происходит наиболее точное совпадение с экспериментальными данными (кривая 5, рис. 2), имеют вид:

- при $Q_{пож} < 1,0$ МВт:

$$\gamma = 0; \quad (7)$$

- в диапазоне $1,0 \text{ МВт} \leq Q_{пож} < 10,0$ МВт (с достоверностью аппроксимации 0,992):

$$\gamma = 2,78 \cdot Q_{пож} - 2,78. \quad (8)$$

Использование теории пограничного слоя позволяет объяснить наблюдаемое в экспериментах прекращение роста высоты факела с увеличением мощности тепловыделения при $Q_{пож} > 4-5$ МВт.

Увеличение мощности тепловыделения приводит к росту захвата холодного воздуха из окружающей среды в конвективную колонку и, соответственно, увеличению массовых расходов по поперечному сечению колонки и угла полуоткрытия колонки. В то же время происходит более интенсивный рост толщины пограничного слоя, который компенсирует увеличение радиуса колонки, и высота смыкания пограничных слоев на оси колонки практически не меняется.

Заключение

Определение высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости с использованием теории пограничного слоя позволяет получить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и объяснить значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по высоте пламени при мощностях тепловыделения $Q_{\text{пож}} > 4-5$ МВт.

Для дальнейшего развития зонных моделей необходимо проведение дополнительных численных исследований с использованием полевой модели расчета динамики опасных факторов пожара [6] и проведения полномасштабных физических экспериментов в постановке задачи, существенно отличной от приведенных в литературе, с целью изучения влияния термогазодинамических условий пожара на форму конвективной колонки и высоту факела.

Обозначения

c_f – коэффициент трения в пограничном слое; c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); F – площадь поперечного сечения конвективной колонки, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; G – массовый расход газов через поперечное сечение колонки, отстоящее по высоте от поверхности горения на расстояние x , кг/с; L – характерный размер, м; p_a – атмосферное давление в помещении перед пожаром, Па; $Q_{\text{пож}}$ – тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения, Вт; r – радиус поверхности горючей жидкости, м; R – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К); Re^* , Re_L – числа Рейнольдса; T_a – температура воздуха в помещении перед пожаром, К; T_0 – температура газовой смеси на внешней границе пограничного слоя, К; w_0 – скорость на внешней границе пограничного слоя, м/с; x – координата вдоль оси симметрии колонки (вдоль длины пограничного слоя), отсчитываемая от поверхности горения, м; $\bar{x}=x/L$ – относительная координата вдоль длины пограничного слоя; $x_{\text{пл}}$ – высота пламенной зоны, м; γ – угол полуоткрытия конвективной колонки, рад; χ – доля, приходящаяся на поступающий в ограждения тепловой поток от выделившейся в очаге горения тепловой мощности; δ – толщина динамического пограничного слоя, м; ρ_a – плотность холодного воздуха, кг/м³; ρ_0 – плотность газовой смеси на внешней границе пограничного слоя, кг/м³; Ψ_{Σ} – относительный закон трения; Ψ_T , Ψ_{ε} – относительные законы трения для учета неизотермичности и внешней турбулентности соответственно.

Литература

1. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires // Spill Fires. 2000. P. 1-36.
2. Коротеев А.С., Алемасов В.Е., Полежаев Ю.В. и др. Законы горения / Под общей редакцией Ю.В. Полежаева. Москва: УНПЦ «Энергомаш», 2006.
3. Пузач С.В., Абакумов Е.С. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в атриуме // ИФЖ. 2007. Т. 80, № 2. С. 84–89.

4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
5. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2000.
6. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2005.