

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫСОТЫ ПЛАМЕННОЙ ЗОНЫ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ГОРЕНИИ ЖИДКОСТИ**

*Предложен метод расчёта высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкостей с использованием теории пограничного слоя. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных, полученных при горении авиационного керосина. Получена зависимость угла полураскрытия конвективной колонки от мощности тепловыделения.*

*Ключевые слова: пожар, пламенная зона, диффузионное горение, конвективная колонка.*

*S.V. Puzach, V.G. Puzach, I.V. Dutov, E.S. Abakumov*

## **DEFINITION OF FLAME HEIGHT ZONE IN CASE OF LIQUID DIFFUSION COMBUSTION**

*Method for calculating of the height of the flame zone during a diffusion combustion of liquid using boundary layer theory is proposed. A comparison calculated and experimental data is made in case of burning of kerosene. The dependence the half-angle of convective column from heat output of fire is received.*

*Key words: fire, flame zone, diffusion burning, convective column.*

Высота пламенной зоны является важным параметром, знание которого необходимо при решении большого круга задач пожарной безопасности. Например, при определении времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара с использованием зонной модели в зависимости от высоты факела пламени осуществляется выбор формулы для расчёта массового расхода газовой смеси, поступающей из конвективной колонки, образующейся над поверхностью горения, в припотолочный слой.

В зонном методе расчёта динамики опасных факторов пожара [1, 2] учёт формы конвективной колонки осуществляется через величину условного угла полураскрытия колонки. Угол полураскрытия определяется, в первую очередь, мощностью тепловыделения, связанной с высотой диффузионного факела.

Сравнение существующих эмпирических формул расчёта высоты диффузионного пламени с экспериментальными данными показывает, что при больших мощностях тепловыделения ( $Q_{\text{пож}} > 4-5 \text{ МВт}$ ) теоретическая высота пламени может превышать экспериментальное значение в несколько раз [3, 4].

В работе [4] для ламинарных и турбулентных режимов горения горючих газов, предварительно перемешанных с окислителем, предложена теоретическая модель, качественно и количественно согласующаяся с экспериментальными данными. Формулы для определения безразмерной высоты факела получены с использованием известных критериальных формул теплообмена при

установившемся ламинарном и турбулентном обтекании плоской пластины и не учитывают существенного изменения параметров потока внутри факела, вызванного его условно-конической формой, при горении жидкости.

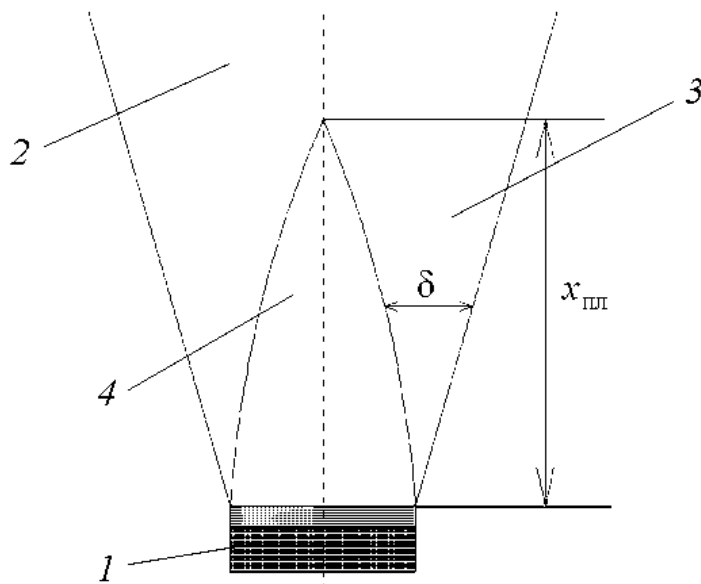
Авторами проведено исследование возможности использования теории пограничного слоя для расчёта высоты пламенной зоны в случае диффузионного горения жидкостей с последующим определением угла полураскрытия конвективной колонки.

### Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема диффузионного горения жидкости.

Вводятся следующие допущения и упрощения сложной термогазодинамической картины течения процесса горения:

- конвективная колонка имеет коническую форму, задаваемую углом полураскрытия колонки;
- границы конвективной колонки между газовой смесью продуктов горения и окружающим воздухом являются условно непроницаемыми и твердыми.



**Рис. 1.** Схема диффузионного горения жидкости:

- 1 – горючая жидкость; 2 – конвективная колонка; 3 – пограничный слой;  
4 – пламенная зона;  $\delta$  – толщина динамического пограничного слоя

Принимаем, что на границах конвективной колонки развиваются динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои.

При расчёте параметров пограничных слоёв вводятся следующие допущения:

- пограничный слой является турбулентным;
- выполняется тройная аналогия Рейнольдса [5] (согласно которой существует подобие концентрационных, тепловых и динамических пограничных слоёв);

- пограничные слои являются плоскопараллельными (влиянием кривизны условной поверхности конвективной колонки пренебрегаем);
- влиянием продольного градиента давления на толщину пограничных слоев пренебрегаем [6, 7].

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

### Зонная математическая модель

При использовании полуэмпирического метода [1, 2] массовый расход по сечению конвективной колонки находится из решения дифференциального уравнения:

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

где  $G$  – массовый расход газов через поперечное сечение колонки, отстоящее по высоте от поверхности горения на расстояние  $x$ , кг/с;

$x$  – координата вдоль оси симметрии колонки, отсчитываемая от поверхности горения, м;

$B$  – размерный параметр, кг·°К/(м·с):

$$B = \frac{Q_{\text{пож}}(1 - \chi)}{x_{\text{пл}} c_p};$$

$Q_{\text{пож}}$  – тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения, Вт;

$\chi$  – доля, приходящаяся на поступающий в ограждения тепловой поток от выделившейся в очаге горения тепловой мощности;

$x_{\text{пл}}$  – высота пламенной зоны, м;

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°К);

$r$  – радиус поверхности горючего материала, м;

$\gamma$  – угол полураскрытия конвективной колонки, рад;

$T_a$  – температура воздуха в помещении перед пожаром, °К;

$A$  – размерный параметр, с<sup>2</sup>·м<sup>5</sup>/(кг<sup>2</sup>·°К):

$$A = \frac{T_a R^2}{g p_a^2 \pi^2};$$

$R$  – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°К);

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$p_a$  – атмосферное давление в помещении перед пожаром, Па.

### Метод расчёта параметров пограничного слоя

Интегральное уравнение импульсов для плоского пограничного слоя при введенных допущениях имеет вид [5]:

$$\frac{d \operatorname{Re}^{**}}{d\bar{x}} = \frac{c_f}{2} \operatorname{Re}_L, \quad (2)$$

где  $Re^{**}$ ,  $Re_L$  – числа Рейнольдса:

$$Re^{**} = \frac{\rho_o w_o \delta^{**}}{\mu_o};$$

$$Re_L = \frac{\rho_o w_o L}{\mu_o},$$

$\rho_o$  – плотность газовой смеси на внешней границе пограничного слоя,  $кг/м^3$ ;

$w_o$  – скорость газовой смеси на внешней границе пограничного слоя,  $м/с$ ;

$\delta^{**}$  – толщина потери импульса,  $м$ :

$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho w_x}{\rho_o w_o} \left(1 - \frac{w_x}{w_o}\right) dy;$$

$\rho$  – плотность газовой смеси,  $кг/м^3$ ;

$w_x$  – проекция скорости газовой смеси на ось  $x$  внутри пограничного слоя,  $м/с$ ;

$\mu_o$  – коэффициент динамической вязкости,  $кг/(с·м)$ ;

$L$  – характерный размер,  $м$ ;

$\bar{x}$  – относительная координата вдоль длины пограничного слоя ( $\bar{x} = x/L$ );

$c_f$  – коэффициент трения:

$$c_f = \frac{2 \tau_w}{\rho_o w_o^2};$$

$\tau_w$  – касательное напряжение на стенке,  $Па$ .

Коэффициент трения из уравнения (2) определяется из [5]:

$$c_f = c_{f0} \Psi_{\Sigma}, \quad (3)$$

где  $c_{f0}$  – коэффициент трения в "эталонном" пограничном слое [5]:

$$c_{f0} = B / (Re^{**})^m;$$

$$B = 0,0256;$$

$$m = 0,25;$$

$\Psi_{\Sigma}$  – относительный закон трения [5]:

$$\Psi_{\Sigma} = \Psi_T \Psi_{\varepsilon}; \quad (4)$$

$\Psi_T$ ,  $\Psi_{\varepsilon}$  – относительные законы трения для учёта соответственно неизотермичности и внешней турбулентности:

$$\Psi_T = \left[ \frac{2}{\sqrt{T_w / T_w^*} + 1} \right]^2;$$

$T_w$  – температура стенки,  $^{\circ}К$ ;

$T_w^*$  – равновесная температура стенки,  $^{\circ}К$ ;

$$T_w^* = T_0 \left( 1 + r_v \frac{w_0^2}{2c_p} \right);$$

$T_0$  – температура газовой смеси на внешней границе пограничного слоя;  
 $r_v$  – коэффициент восстановления:

$$r_v = \sqrt[3]{\text{Pr}};$$

$\text{Pr}$  – число Прандтля;

$$\Psi_\varepsilon = 1 + 0,25 \operatorname{th}(0,2\varepsilon_0);$$

$\varepsilon_0$  – величина внешней турбулентности, %.

### Дополнительные соотношения

Уравнение закона сохранения массы для поперечного сечения конвективной колонки имеет вид:

$$G = \rho_0 w_0 F, \quad (5)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения конвективной колонки,  $\text{м}^2$ .

Массовый расход газовой смеси в сечении конвективной колонки, расположенном внутри пламенной зоны, в первом приближении определяется по формуле [8]:

$$G = 0,032 \left( \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{3/5} x. \quad (6)$$

Температура газовой смеси на внешней границе пограничного слоя  $T_0$  определяется согласно [8]:

$$T_0 = T_a + \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p G}. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения конической конвективной колонки:

$$F = \pi(r + x \operatorname{tg} \gamma)^2. \quad (8)$$

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

Параметры на внешней границе пограничного слоя ( $\rho_0$ ,  $w_0$ ,  $T_0$  и др.) определяются с использованием выражения (5), в котором массовый расход находится из решения дифференциального уравнения (1) или (6).

Уравнения (1) и (2) решаются численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Замкнутая система уравнений (2)-(8) решается до тех пор, пока толщина  $\delta$  динамического пограничного слоя (а в соответствии с аналогией Рейнольдса и концентрационного по кислороду пограничного слоя) не станет равна радиусу поперечного сечения конвективной колонки:

$$\delta = r + x \operatorname{tg} \gamma. \quad (9)$$

Величина  $x$ , при которой выполняется условие (9), будет являться искомой высотой факела  $x_{\text{пл}}$ .

Рассматриваются следующие эмпирические формулы для расчёта высоты факела, приведённые в литературных источниках (выражения Heskestad и Thomas [3]):

$$x_{\text{пл}} = 0,235 \left( \frac{Q_{\text{пож}}}{1000} \right)^{2/5} - 2,04r; \quad (9)$$

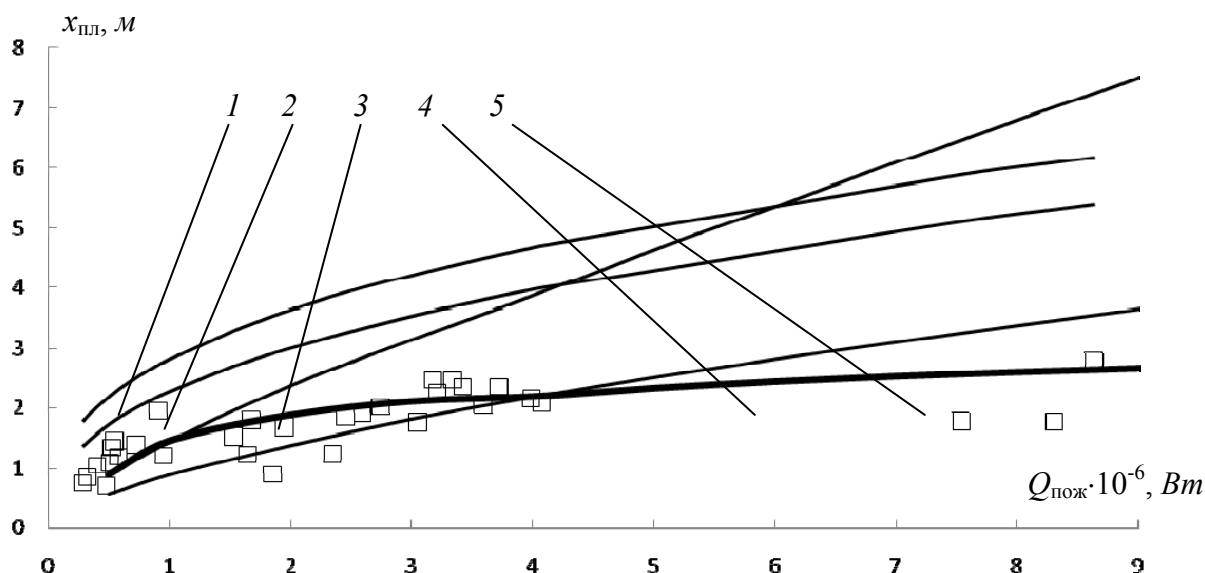
$$x_{\text{пл}} = 84r \left( \frac{\psi}{\rho_a \sqrt{2gr}} \right)^{0,61}, \quad (10)$$

где  $\psi$  – удельная скорость выгорания,  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ;  
 $\rho_a$  – плотность холодного воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

### Результаты численного эксперимента и их анализ

В экспериментах [3] исследовалось горение авиационного керосина.

Расчётные и экспериментально полученные [3] зависимости высоты пламенной зоны от мощности тепловыделения в очаге горения представлены на рис. 2.



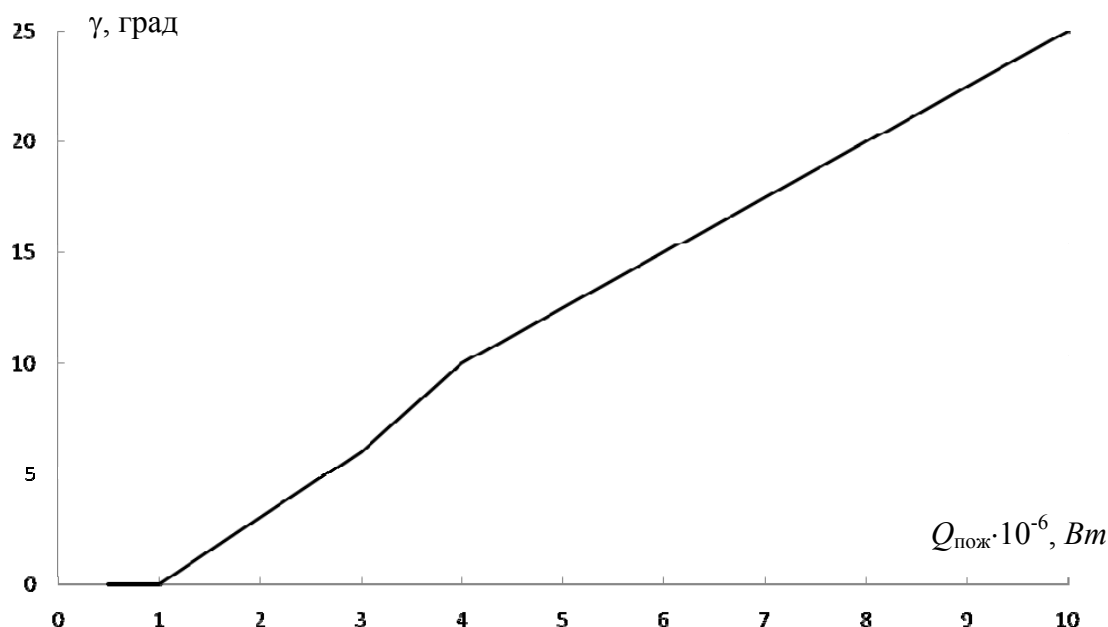
**Рис. 2.** Зависимость высоты пламенной зоны от мощности тепловыделения в очаге горения:  
 1 – уравнение (9) [1]; 2 – уравнение (10) [1]; 3 –  $\gamma = 0$ ;  
 4 –  $\gamma = 10^\circ$ ; 5 –  $\gamma$  изменяется в соответствии с рис. 3;  
 □ – экспериментальные данные [3]

Из рисунка видно удовлетворительное совпадение расчётных с экспериментальными данными

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

Расчёт с использованием формулы (9) (кривая 1) дает существенно завышенную высоты пламени во всем диапазоне мощностей тепловыделения.

Зависимость угла полуоткрытия конвективной колонки от мощности тепловыделения в очаге горения, при использовании которой в уравнении (1) наблюдается наиболее точное совпадение с экспериментальными данными (рис. 2, кривая 5), приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость угла полуоткрытия конвективной колонки от мощности тепловыделения в очаге горения

Результаты численного эксперимента можно аппроксимировать следующими зависимостями:

- при  $Q_{\text{пож}} < 1,0 \text{ МВт}$ :  $\gamma = 0$ ;
- при  $1,0 \text{ МВт} \leq Q_{\text{пож}} < 10,0 \text{ МВт}$  (с достоверностью аппроксимации 0,992):  $\gamma = 2,78 Q_{\text{пож}} - 2,78$ .

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

Увеличение мощности тепловыделения приводит к повышению интенсивности захвата холодного воздуха из окружающей среды в конвективную колонку и, соответственно, к увеличению массовых расходов по поперечному сечению колонки и угла её полуоткрытия. 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 расчётных данных с экспериментальными и объяснить значительное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по высоте пламени при мощностях тепловыделения  $Q_{\text{пож}} > 4-5 \text{ МВт}$ .

Для дальнейшего развития зонных моделей необходимо проведение дополнительных численных исследований с использованием полевой модели расчёта динамики опасных факторов пожара 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.

## Литература

1. **Пузач С.В., Абакумов Е.С.** Модифицированная зонная модель расчёта термогазодинамики пожара в атриуме // Инженерно-физический журнал, 2007. Т. 80, № 2. С. 84-89.
2. **Пузач С.В., Абакумов Е.С.** Модифицированная зонная модель расчёта тепломассообмена при пожаре в атриуме // Пожаровзрывобезопасность, 2007. Т. 16, № 1. С. 53–57.
3. **Gottuk D.T., Gott J.E., Williams F.W.** Fire dynamic of spill fires // Spill Fires, 2000. P. 1-36.
4. Законы горения / Коротеев А. С., Алемасов В. Е., Полежаев Ю. В. и др. М. : УНПЦ "Энергомаш", 2006.
5. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М. : Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
6. **Пузач С.В.** Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
7. **Пузач В.Г., Пузач С.В.** Расчёт трения и теплообмена при течении газа в каналах и внешнем обтекании тел // Известия РАН. Энергетика, 1996. № 2. С. 44-54.
8. **NFPA 92B.** Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2005.