

УДК 614.838.44:536.3

А.С. БАРАНОВСКИЙ, нач. сектора; П.А. ЛЕОНЧУК, нач. сектора; С.А. ЗУЕВ, вед. науч. сотр., канд. техн. наук; В.Г. ШАМОНИН, вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

## ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

В работе продолжается рассмотрение подходов к обоснованию сокращения противопожарного разрыва между объектами различного функционального назначения, статья является продолжением публикаций [1–3]. Рассматривается пожар в одном помещении здания. Приведены приближенные расчетные формулы для теплового потока на фасад соседнего здания, а также элементарные расчетные формулы для вычисления угловых коэффициентов. Представлена дополнительная информация из литературных источников по характеристикам фасадного факела.

**Ключевые слова:** радиационный поток, предельно допустимая плотность потока, угловые коэффициенты, степень черноты, фасадный факел, линейные масштабы факела, высота факела, нейтральная плоскость, температура факела, элементарная площадка, формула Стокса

### Введение

В данной статье авторы продолжают рассматривать проблему, сформулированную в работе [1], а также в статьях [2, 3].

Рассматривается излучение от оконных проемов помещения и настенного (фасадного) факела. Величины, фигурирующие в нижеследующих формулах, обозначены в предыдущих публикациях [2, 3].

### 1. Радиационный поток и угловые коэффициенты

Среднеповерхностная плотность потока излучения на уровне оконного проема и фасадного факела оценивается следующими формулами [4, 5]:

$$q_G = \varepsilon_g \sigma (T_G^4 - T_\infty^4), \quad q_f = \varepsilon_f \sigma (T_f^4 - T_\infty^4). \quad (1)$$

Степень черноты факела оценивается по формуле (7), приведенной в статье [3], где  $l = l_2$  – второй линейный масштаб, приближенно равный толщине факела (формула (16) в статье [2]).

Предварительно ограничимся рассмотрением только излучения от оконных проемов. Падающий (на элементарную площадку нагреваемого участка поверхности) поток рассчитывается по формуле

$$q_{in} = q_G \Phi, \quad (2)$$

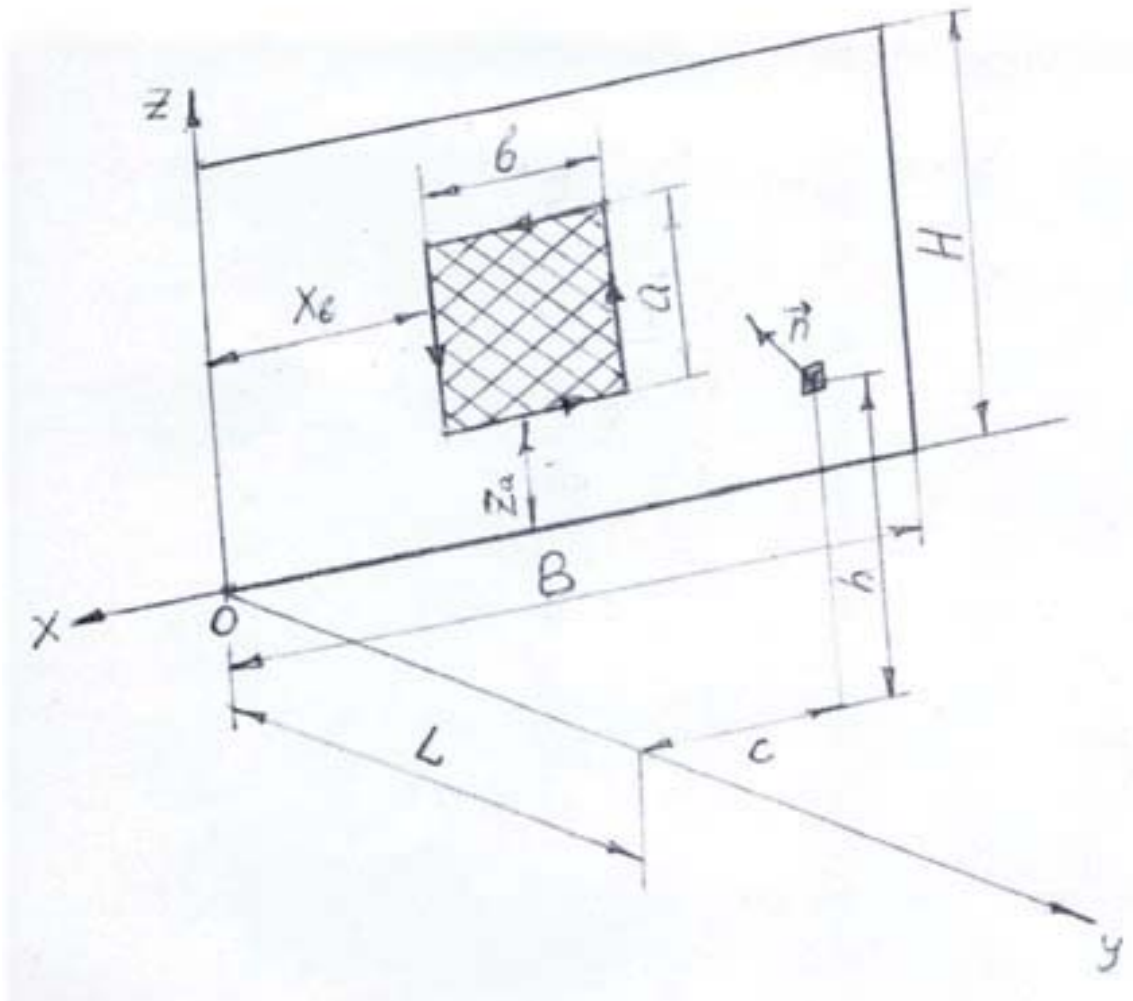
где  $\Phi$  – искомый угловой коэффициент [4, 5].

Для углового коэффициента, определяемого конфигурацией излучающей поверхности, в учебниках (и монографиях) по радиационному теплообмену приведена формула в виде поверхностного интеграла. В тех случаях, когда в указанных источниках отсутствуют конечные формулы для расчета углового коэффициента (в виде элементарных функций), удобно воспользоваться формулой

Стокса, сводящей фигурирующий в определении  $\Phi$  (элементарная площадка – излучающая поверхность) поверхностный интеграл к контурным интегралам по границе видимой части излучающей поверхности [5]:

$$2\pi\Phi = n_x\Phi_x + n_y\Phi_y + n_z\Phi_z, \quad (3)$$

где  $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$  – компоненты единичной нормали к элементарной площадке, а  $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$  – контурные интегралы, определяемые конфигурацией излучающей поверхности (на рис. 1 стрелками обозначены направления контурного интегрирования).



**Рис. 1. Взаимное расположение элементарной площадки и оконного проема**

На рис. 1 изображен фрагмент лицевого фасада объекта, представляющий собой наиболее опасный пожарный отсек этажа, где возник пожар, и обращенный в сторону облучаемого объекта, находящегося на расстоянии  $L$ . Координатная система может быть выбрана произвольно, но на рис. 1 выбрана так, чтобы плоскость  $XOY$  совпадала с полом этажа, где возник пожар.

В нижеследующих расчетных формулах [5] для фрагмента центрального фасада все геометрические характеристики взаимодействия оконный проем ↔ элементарная площадка приведены в безразмерном виде:  $\bar{a} = a/L$  и т. д., однако для простоты черточки опущены.

$$\begin{aligned} \Phi_x = & -\frac{1}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{z_a+a-h}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{z_a-h}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} \right] \\ & + \frac{1}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{z_a+a-h}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{z_a-h}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} \right]. \\ \Phi_y = & -\frac{c-b}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{z_a+a-h}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{z_a-h}{\sqrt{1+(c-x_b)^2}} \right] \\ & + \frac{c-x_b-b}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{z_a+a-h}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{z_a-h}{\sqrt{1+(c-x_b-b)^2}} \right] \\ & - \frac{z_a+a-h}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{c-x_b}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c-x_b-b}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} \right] \\ & + \frac{z_a-h}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{c-x_b}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c-x_b-b}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} \right]. \\ \Phi_{z=} = & -\frac{1}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{c-x_b}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c-x_b-b}{\sqrt{1+(z_a+a-h)^2}} \right] \\ & + \frac{h}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{c-x_b}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{c-x_b-b}{\sqrt{1+(z_a-h)^2}} \right]. \end{aligned}$$

При наличии нескольких оконных проемов в помещении (пожарном отсеке) будем иметь:

$$\Phi_x = \sum \Phi_{xk}, \quad (4)$$

где суммирование проводится по оконным проемам; аналогичные суммы имеют место и для  $\Phi_y, \Phi_z$ .

Если оконные проемы не имеют прямоугольной формы (как на рис. 1), а, например, круглые или эллипсоидальные, то вычисление угловых коэффициентов также сводится к вышеупомянутым контурным интегралам

В случае если облучаемая поверхность не является гладкой, то ориентируясь на локальный критерий воспламенения, нетрудно показать, что наилучшей ориентации элементарной площадки отвечает максимальное значение углового коэффициента:

$$2\pi\Phi_{\max} = (\Phi_x^2 + \Phi_y^2 + \Phi_z^2)^{1/2}. \quad (5)$$

При учете излучения настенного факела формулы (3)–(5) аналогичны:

$$q_{in} = q_G \Phi_G + q_f \Phi_f, \quad 2\pi \cdot q_{in} = (\vec{q} \cdot \vec{n}),$$

где  $q_x = q_G \Phi_{G,x} + q_f \Phi_{f,x}$  и аналогичные формулы для других компонентов;

$$2\pi \cdot q_{\max} = (q_x^2 + q_y^2 + q_z^2)^{1/2}. \quad (6)$$

## 2. Фасадный факел: дополнительная информация

Как отмечалось в нашей предыдущей публикации [2], задача заключается в построении упрощенной модели фасадного факела, чтобы можно было оценить вклад его излучения в радиационный нагрев противостоящего объекта.

В ряде публикаций, приведенных в списке литературы в статье [2] (№ 5, 7, 8, 21), а также в статье [6] на основе анализа размерности и результатов экспериментов предложена формула для высоты факела  $Z_f$ , отсчитываемой от

нейтральной плоскости (0,4h):

$$\frac{Z_f}{l_1} = f_{cn}(Q_{EXT}^*) = f_{cn}\left(\frac{Q_{EXT}}{\left(\rho_{\infty} C_{p,\infty} T_{\infty} \sqrt{g l_1^2}\right)^{5/4}}\right), \quad (7)$$

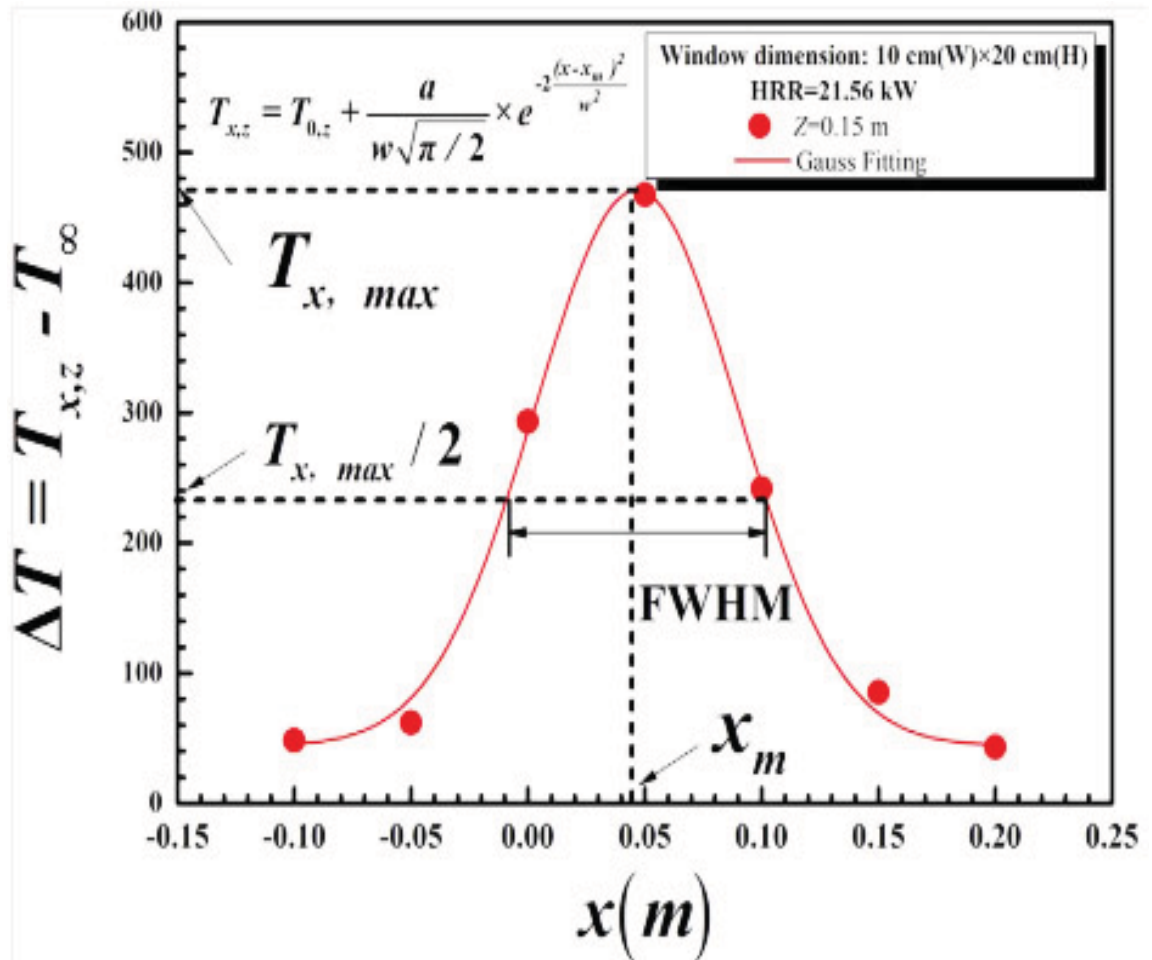
где  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – изобарная теплоемкость;  $T$  – температура;  $g$  – ускорение свободного падения, индекс  $\infty$  обозначает окружающий воздух, а масштаб  $l_1$  и скорость тепловыделения в факеле  $Q_{EXT}$  упомянуты в статье [2];  $f_{cn}$  – некоторая функция.

Авторы [6] конкретизировали вид этой зависимости на основании проведенных экспериментов, а также обобщили ее на случай отсутствия фасадной стены (выброс пламени из оконного проема на последнем этаже при отсутствии чердачного помещения):

$$\frac{Z_f}{l_1} = \begin{cases} 2,72 Q_{ex}^{2/5}, & \text{отсутствие фасадной стены} \\ 3,573 Q_{ex}^{2/5}, & \text{фасадная стена} \end{cases}. \quad (8)$$

Что касается публикаций по распределению температуры в объеме факела, то их еще очень мало. Можно упомянуть лишь [2, 6–8].

Определенный интерес представляет работа [6], где предложен температурный (Гауссов) профиль на основании серии экспериментов (рис. 2).



**Рис. 2.** Типичное приближение горизонтального профиля температуры фасадного факела в отсутствии ограждающей стены гауссовой кривой

Нормализованная форма кривой на рис. 2 авторами [6] представлена в виде:

$$\frac{T_{z,x}-T_{\infty}}{T_{z,\max}-T_{\infty}} = \exp \left[ -\beta \left( \frac{x-x_m}{FWHM} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где  $\beta = 2 \cdot \ln 2 \approx 1,386$ .

Координату  $x$  авторы [6] называют горизонтальной. По-видимому, они имеют в виду осесимметричный факел, упоминая статью [8]. Ясно, что максимальная температура на оси факела  $T_{z,\max}$  и дисперсия  $FWHM$  зависят, главным образом, от скорости тепловыделения в факеле  $Q_{EHT}$ , но таких зависимостей, по-видимому, пока еще не получено.

Таким образом, окончательное решение нашей задачи может быть получено (в рамках (КЗ)) при наличии апробированной (на инженерном уровне строгости) модели фасадного факела.

### Заключительные замечания

Численная реализация может быть предложена в следующих этапах.

1. Выбор расчетной области.
2. Нижняя оценка теплового потока.
3. Верхняя оценка теплового потока.

Прежде всего, выбирается «расчетная пара» – пожарный отсек (помещение) и близлежащий к нему оконный проем соседнего объекта (сценарий «а» в статье [1]) или фрагмент деревянной стены или лесополосы (сценарий «б» в статье [1]). В последнем случае фрагмент покрывается двумерной разностной сеткой.

В узлах сетки подсчитывается плотность лучистого потока  $q_{in}$  в рамках (ИЗ) по формулам (1)–(5) и находится максимальное значение потока. При этом наличие фасадного факела не учитывается. Для контроля расчет повторяется на вдвое измельченной сетке. Если при этом полученное значение превосходит предельно допустимое  $q_*$  [1], то проектное решение непригодно, и противопожарный разрыв следует увеличить.

Для получения верхней оценки радиационного нагрева сначала решается адиабатическая задача (АЗ), рассчитывается температура  $T_G$  и поток  $q_G$ . Ясно, что из-за подсоса воздуха в факел его температура (в любой точке объема) будет меньше адиабатической  $T_G$ , в силу того, что толщина модельного составного факела с основанием  $l_1 \times l_2$  [2] меньше характерных размеров помещения; это же относится к степеням черноты.

Поскольку речь идет о верхней оценке и недостаточной информации по конфигурации и теплофизическим характеристикам факела, полагаем  $T_f = T_G$  и  $\varepsilon_f = \varepsilon_G$ . Наконец, в узлах сетки подсчитывается плотность лучистого потока  $q_{in}$  по формулам (6). Напоминаем, что данная верхняя оценка ограничивается 2-, 3- или 4-этажными зданиями (где имеет место пожар), что оговорено в статье [2].

Если при этом полученное значение  $q_{in}$  не превосходит предельно допустимое  $q_*$  [1], то проектное решение считается приемлемым.

### Список литературы

1. Барановский А.С., Леончук П.А., Зуев С.А., Шамонин В.Г. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения. I. Подходы к проблеме. Полевое моделирование // Пожарная безопасность. 2019. № 2. С. 95–99.
2. Барановский А.С., Леончук П.А., Зуев С.А., Шамонин В.Г. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения. II. Фасадный факел // Пожарная безопасность. 2019. № 3. С. 108–111.

3. Барановский А.С., Леончук П.А., Зувев С.А., Шамонин В.Г. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения. III. Пожар в помещении. Оценка температуры // Пожарная безопасность. 2019. № 3. С. 112–116.
4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
5. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. С. 241.
6. Sun X. et al. Flame height and temperature profile of window thermal plume from compartment fire without façade wall // International Journal of Thermal Science. 2018. Vol. 127. p. 53.
7. Yamaguchi J.-i. et al. Temperature Profiles of Window Jet Plume // Fire Science and Technology. 2005. Vol. 24. p. 17.
8. Quintiere J.G. et al. A unified analysis for fire plumes // 27th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1998. p. 2757.

*Материал поступил в редакцию 27.02.2019 г.*

**Барановский Алексей Сергеевич** – начальник сектора. Тел. (495) 524-81-37. E-mail: K708@yandex.ru; **Леончук Петр Алексеевич** – начальник сектора. Тел. (495) 524-82-09. E-mail: pa.leonchuk@yandex.ru; **Зувев Станислав Анатольевич** – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук. Тел. (495) 524-83-45. E-mail: K708@yandex.ru; **Шамонин Валерий Геннадьевич** – ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Тел. (495) 524-82-57. E-mail: K708@yandex.ru (Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)), г. Балашиха, Московская область, Россия.

*A.S. Baranovsky, P.A. Leonchuk, S.A. Zuev, V.G. Shamonin*

### FIRE DISTANCES BETWEEN OBJECTS OF DIFFERENT PURPOSES. RADIATION FLUXES ASSESSMENT

The work continues to consider approaches to the justification of fire gap reducing between objects of different functional purposes and is a continuation of publications [1–3]. There is considered the fire in one room of the building. Approximate calculation formulas for the heat flow to the facade of the neighbour building as well as elementary calculation formulas for calculation of angular coefficients are given. Additional information from the literature on the characteristics of the facade torch is presented.

**Keywords:** *radiation flux, maximum permissible flux density, angular coefficients, degree of blackness, facade torch, torch linear scales, torch height, neutral plane, torch temperature, elementary platform, the Stokes formula*

**Alexey S. Baranovsky** – Head of Sector. Phone: (495) 524-81-37; **Peter A. Leonchuk** – Head of Sector. Phone: (495) 524-82-09; **Stanislav A. Zuev** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. Phone: (495) 524-83-45; **Valery G. Shamonin** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Senior Researcher. Phone: (495) 524-82-57.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.