

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. ПОЖАР В ПОМЕЩЕНИИ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Статья продолжает рассмотрение подходов к обоснованию сокращения противопожарного разрыва между объектами различного функционального назначения, приведенных в публикациях [1–4]. Осуществлена оценка температуры в помещении (пожарном отсеке) при пожаре в режиме, регулируемом вентиляцией, поскольку при этом достигается максимальное значение температуры. Анализируется пожар в помещении на первом этаже трехэтажного здания детского сада. Рассматриваются два предельных случая теплообмена со стенами помещения: изотермический и адиабатный. Расчет проведен для характерных параметров жилых и административных зданий (где происходит пожар).

Решение системы 7 трансцендентных уравнений проводилось методом Зейделя для двух предельных случаев: адиабатического и изотермического, значения температуры оказались при этом близки (разница $\approx 0,5\%$).

Ключевые слова: радиационный поток, пожар, регулируемый вентиляцией, адиабатическая температура, теплообмен со стенами

В данной статье авторы продолжают освещать проблему, сформулированную в статье [1], а также в статьях [2–4].

Рассматривается квазистационарная стадия пожара в помещении, регулируемого вентиляцией. При этом рассматривается случай пожара в административном (или жилом) здании: имеем толстые стены и низкую теплопроводность строительных материалов.

Уравнения баланса и граничные условия

Эти соотношения, представленные в статье [3], имеют вид:

$$\dot{m}_{air} \cdot \Delta H_{air} = \dot{m}_{air} \cdot C_p \cdot (T_G - T_\infty) + \varepsilon_G \sigma \cdot S_{windows} (T_G^4 - T_\infty^4) + \dot{Q}_W, \quad (1)$$

$$\dot{Q}_W = 0 \text{ (А3)}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_g \varepsilon_p \sigma (T_G^4 - T_w^4) + \alpha_w (T_G - T_w) = q_w = \lambda_p (T_w - T_0) / d \text{ (ИЗ)}. \quad (3)$$

Суммарные кондуктивные теплотери подсчитываются по формуле

$$\dot{Q}_W = \sum_{i=1}^5 q_{wi} \cdot S_{wi}, \quad (4)$$

где суммирование ведется по всем ограждающим поверхностям; S_{wi} – площади ограждений (рис. 1); S_{w1} – площадь внутренней лицевой поверхности за вычетом суммарной площади оконных проемов; S_{w5} – площадь потолочного перекрытия.

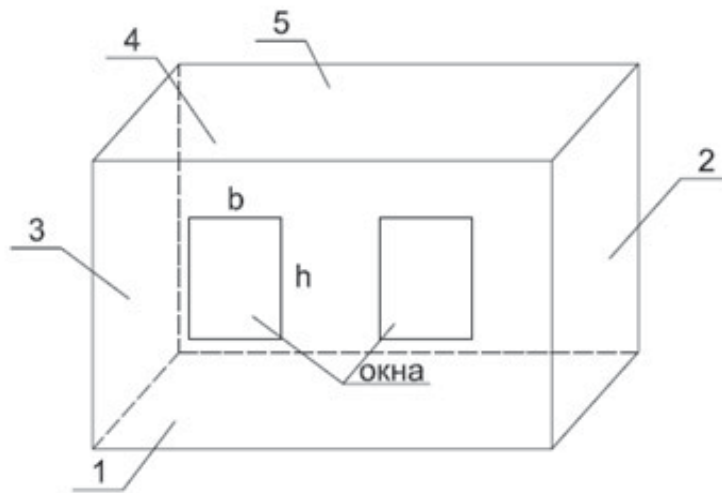


Рис. 1. Схема помещения:
1 – стена фасада здания;
2 и 3 – боковые стены между соседними помещениями;
4 – стена между помещением и коридором;
5 – потолочное покрытие

Остальные соотношения и обозначения констант и переменных представлены в статье [3]. Совокупность уравнений (1)–(4) представляет собой систему семи трансцендентных (за счет α_w) уравнений относительно неизвестных T_G, T_{wi} ($i = \overline{1,5}$) и \dot{Q}_w , т. е. типа $F_i(x_j) = 0, i, j = \overline{1,7}$.

Эту систему можно решать методами Зейделя [5, 6]) или Стеффенсена [7], либо Ньютона (или одной из его модификаций) [8]. В последнем случае необходим расчет элементов матрицы Якоби, что убыстряет сходимость, но усложняет процедуру. Можно также решать эквивалентную вариационную задачу поиска минимума функции нескольких переменных

$$\Phi(\vec{x}) = \sum_{i=1}^7 F_i^2(\vec{x}).$$

Среди безградиентных методов минимизации (не требующих вычисления матриц Якоби и Гессе) можно выделить метод локальных вариаций [9, 10].

Приведем систему (1)–(4) к безразмерному виду. Введем еще безразмерные постоянные:

$$\begin{aligned} C_{151} &= \alpha_{w,ref}/(\epsilon_{gw} \cdot \sigma \cdot (T_{max})^3); C_{152} = \lambda_{p,ref}/(\epsilon_{gw} \cdot \sigma \cdot (T_{max})^3)/d_{max}; \\ C_{61} &= C_{p,ref} \cdot T_{max}/\Delta H_{air}; C_{62} = \epsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_{max})^4 \cdot S_{windows}/\dot{Q}_C; \\ C_7 &= \lambda_{p,ref} \cdot T_{max} \cdot S_{w,max}/(\dot{Q}_C \cdot d_{max}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь обозначено T_{max} – максимально возможное значение адиабатической температуры; $\alpha_{w,ref}$ – опорное значение коэффициента теплоотдачи; $S_{w,max} = \max S_{w,i}$ и $d_{max} = \max d_i, i = \overline{1,5}$; остальные обозначения фигурируют в статье [3]. Наконец обозначим $b_{cp}^{mod} = b_{cp} \cdot T_G^{ad}/T_{ref}$, где согласно формуле (9) в статье [3] $C_p/C_{p,ref} = a_{cp} + b_{cp} \cdot T_G/T_{ref}, a_{cp} = 0,80884; b_{cp} = 0,18282$.

В итоге система балансных уравнений (1)–(4) в безразмерных переменных примет вид:

$$\begin{aligned} F_i(\vec{x}) &= x_6^4 - x_i^4 + C_{151} \overline{\alpha}_w(x_i, x_6)(x_6 - x_i) - C_{152} \overline{\lambda}_p(x_i - \overline{T}_{0,i})/\overline{d}_i = 0, i = \overline{1,5}; \\ F_6(\vec{x}) &= -1 + C_{61}(a_{cp} + b_{cp}^{mod} x_6)(x_6 - \overline{T}_\infty) + C_{62}(x_6^4 - \overline{T}_\infty^4) + x_7 = 0; \\ F_7(\vec{x}) &= C_7 \overline{\lambda}_p \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\overline{S}_{w,i}}{\overline{d}_i} \cdot (x_i - \overline{T}_{0,i}) - x_7 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

В системе (6) нелинейных «почти» алгебраических уравнений относительно неизвестных $x_i = T_{w,i}/T_{max}, i = \overline{1,5}; x_6 = T_G/T_{max}; x_7 = \dot{Q}_w/\dot{Q}_C$ верхней чертой обозначены теплофизические коэффициенты и параметры: $\overline{\alpha}_w = \alpha_w/\alpha_{w,ref}; \overline{\lambda}_p = \lambda_p/\lambda_{p,ref}; \overline{T}_{0,i} = T_{0,i}/T_{max}$ (см. (10) в статье [3]);

$$\overline{T_\infty} = T_\infty/T_{\max}; \overline{S_{w,i}} = S_{w,i}/S_{w,\max}, \overline{d_i} = d_i/d_{\max}.$$

Неизвестные в системе (6) должны удовлетворять «естественным» очевидным ограничениям (не только как окончательное решение, но и (желательно) в ходе итераций):

$$\overline{T_{0,i}} \leq x_i \leq x_6 \leq x_{6\max}, i = \overline{1,5}; x_7 \leq 1, \quad (7)$$

где $x_{6\max} = T_{ad}/T_{\max}$ – безразмерная адиабатическая температура (решение (6) с $x_7 = 0$).

Пример расчета. Входные данные

Рассматривается пожар в помещении на первом этаже (оси 1–3, рис. 2) трехэтажного здания класса Ф1.1. На рис. 3 изображен фрагмент плана здания.



Рис. 2. Фрагмент лицевого фасада объекта

В помещении – три окна высотой ($h = 2,3$ м); два широких ($b = 3,8$ м) и одно – узкое ($b = 1,11$ м) (см. рис. 1 в [3]). Отсюда суммарная площадь оконных проемов $S_{windows} = 20,033$ м².

Аналогично температурной зависимости изобарной теплоемкости (соотношение (9) в [3]) для «опорной» температуры $T_{ref} = 873$ К и табличных соответствующих значений теплофизических характеристик дымовых газов [11]: кинематической вязкости ϑ_{ref} , теплопроводности λ_{ref} и числа Прандтля Pr_{ref} были получены коэффициенты линейной аппроксимации.

Далее, $\varepsilon_p = 0,91$ [11], $\lambda_p = 0,7 \cdot 10^{-3}$ кВт/(м · К), $\alpha_{w,ref} = 10^{-2}$ кВт/(м · К); толщины ограждающих стен и межпотолочного перекрытия (прил. 2): $d_1 = 0,5$ (фасад); $d_2 = 0,2$; $d_3 = 0,5$ (фасад); $d_4 = 0,2$; $d_5 = 0,4$ м (потолок).

Для степени черноты дымовых газов (формулы (7) и (8) в [3], где $K = 1,1$ м⁻¹ – максимальное значение [12]), была получена оценка $\varepsilon_g = 0,993$.

Алгоритм решения ИЗ (методом Зейделя [5, 6]) изложен в статье [3]. Для решения ИЗ была составлена программа на языке Паскаль (в среде Турбо-Паскаль, версия 7.0).

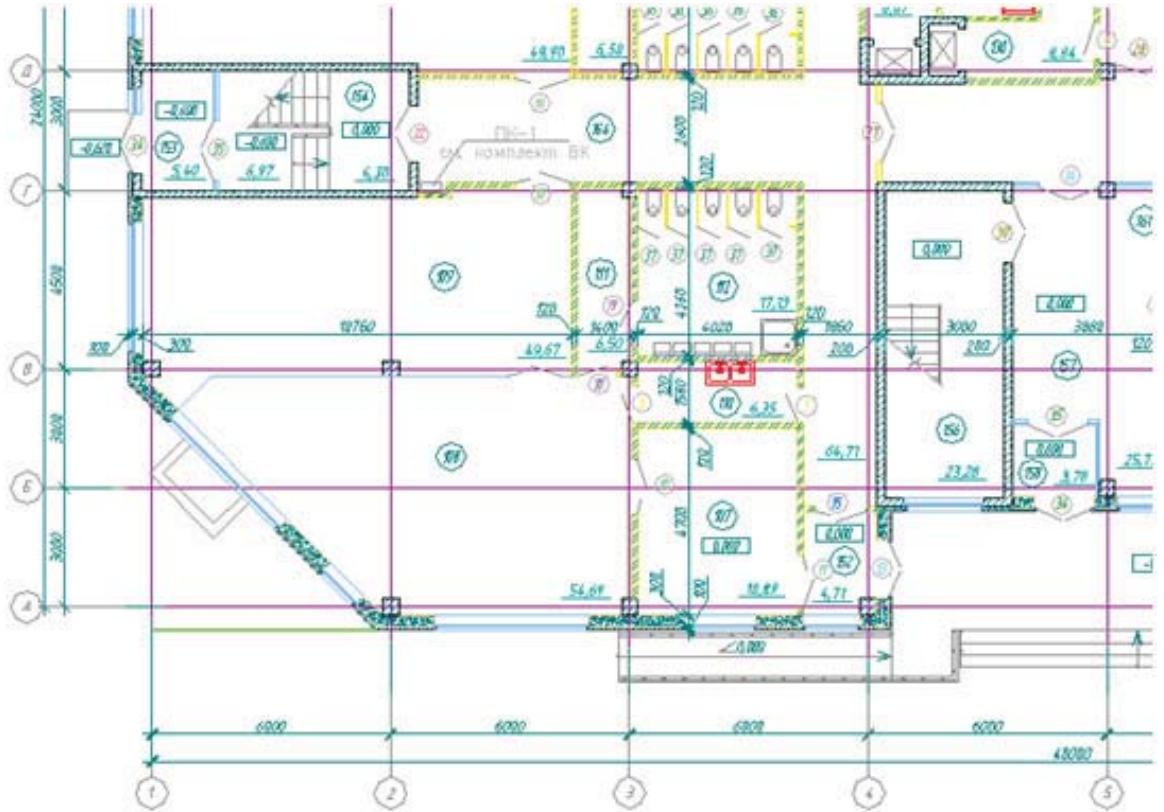


Рис. 3. Фрагмент плана 1-го этажа объекта

Уравнения относительно x_6 и относительно x_i для каждого ограждения решались простым, но надежным методом дихотомии (половинного деления) [5, 6]; процедура BISEC была взята из сборника [12], с. 12, куда было внесено изменение: процедура прекращала работу, когда относительная малость значения функции $y = f(x)$ (по отношению абсолютной величине разности значений функции на концах начального интервала) становилась меньше заданного порога $epsfun$ и относительная малость величины текущего интервала Δx (по отношению к исходному интервалу) становилась меньше заданной величины $epsroot$.

Перечень дополнительных параметров для расчета

$T_{max} = 2000K$ – максимально возможное значение адиабатической температуры сгорания; kTg – коэффициент, задающий начальное приближение для ИЗ (или КЗ); $T_G^{(0)} = T_G^{ad} \cdot kTg$; $interTg$ – счетчик числа итераций при решении уравнений (1) и (3); $intermax = 100$ – максимально допустимое число таких итераций; $epsfun = epsroot = epsfr = 10^{-2} \div 10^{-6}$; допустимые погрешности вычисления корней уравнений (1) и (3).

Таблица иллюстрирует результаты серии расчетов с вышеуказанными входными данными для ИЗ.

Результаты расчетов

$epsfr$	$interTg$	T_G^{ad}, K	T_G^{final}, K	$\dot{Q}_w, кВт$
10^{-2}	2	1826,125	1826,125	506,5755
10^{-3}	3	1833,648	1824,455	506,8389
10^{-4}	4	1833,126	1823,722	506,6243
10^{-5}	4	1833,217	1823,656	506,6093
10^{-6}	4	1833,209	1823,655	506,6088

Полученные цифры свидетельствуют о следующем:

- выбор погрешностей $epsfun = epsroot = epsfr = 10^{-3}$ оказался достаточным для расчета температур T_G^{ad} (К) и T_G^{final} (К);
- имела место очень быстрая сходимость, $interTg \leq 4$;
- для $epsfr = 10^{-3} \dot{Q}_W = 506,84$ кВт, что составляет 0,011 от скорости тепловыделения в помещении ($\dot{m}_{air} \cdot \Delta H_{air} = 45\,572,32$ кВт), а также $T_G^{ad} = T_g$ (А3) = 1833,65 К и $T_G^{final} = T_g$ (И3) = 1824,46 К.

Разница между этими величинами составляет 0,5 %, что свидетельствует об отсутствии необходимости решения КЗ в силу очевидного неравенства [3]: T_g (ИЗ) < T_g (КЗ) < T_g (АЗ).

Эти цифры объясняются тем, что были взяты характерные значения для зданий жилого или административного типа: «толстые» ограждающие стены и низкая теплопроводность строительных конструкций.

Наконец, высокое значение температуры помещения (≈ 1650 °С) можно объяснить значительными площадью оконных проемов (≈ 20 м²) и объемом помещения (≈ 173 м³).

Заключительные замечания

Проведенные расчеты позволяет сделать предварительный вывод, что вышеописанная методика оценки температуры газовой смеси в помещении в начальной стадии пожара в режиме, контролируемом вентиляцией правомерна для зданий жилого или административного типа. Полученное значение температуры можно использовать далее для расчета плотности радиационного потока от всех оконных проемов на область лицевой поверхности соседнего здания, где, предположительно, возможно загорание (а также на кромку прилегающего лесного массива). При этом впоследствии целесообразно учесть вклад фасадного факела (при условии наличия разработанной методики расчета его характеристик), а также возможностью распространения пожара на верхние этажи [2].

В следующей работе предполагается рассмотреть случай пожара в зданиях типа складских и стоянок автомобилей (класса Ф5.2).

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., Зуев С.А., Шамонин В.Г. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения. III. Пожар в помещении. Оценка температуры // Пожарная безопасность. 2019. № 3. С. 112–118.
4. Барановский А.С., Леончук П.А., Зуев С.А., Шамонин В.Г. Противопожарные расстояния между объектами различного назначения. Оценка радиационных потоков // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2019. № 2. С. 42–47.
5. Бахвалов Н.С. и др. Численные методы: учеб. пособие. М.: Наука. Гл. Ред. физ.-мат. лит., 1987. 600 с.
6. Зайцев В.В. Численные методы для физиков. Нелинейные уравнения и оптимизация: учеб. пособие. Самара: Самарский государственный университет, 2005. 86 с.

7. Майергоз М., Хазанкина С.П. Уточнение решений системы нелинейных алгебраических уравнений обобщенным методом Стеффенсена // Алгоритмы и алгоритмические языки. Вып. 4. С. 48–51. М.: ВЦ АН СССР, 1969.

8. Деннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. 440 с.

9. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. М.: Мир, 1974. 376 с.

10. Черноушко Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. М.: Наука, 1973. 240 с.

11. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. 4-е изд., перераб. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 288 с.

12. Агеев М.И. и др. Алгоритмы (1-50). М.: ВЦ АН СССР, 1966. 106 с.

Материал поступил в редакцию 27.02.2019 г.

Барановский Алексей Сергеевич – начальник сектора. Тел. (495) 524-81-37; **Леончук Петр Алексеевич** – начальник сектора. Тел. (495) 524-82-09; **Зуев Станислав Анатольевич** – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук. Тел. (495) 524-83-45; **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

ASSESSMENT OF FIRE DISTANCES BETWEEN OBJECTS OF DIFFERENT PURPOSES. FIRE IN PREMISES OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS. CALCULATION EXAMPLE

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 [1–4]. There is carried out the evaluation of the temperature in a room (fire compartment) at fire at the mode controlled by ventilation, as the maximum temperature value is reached. Fire in a room on the first floor of a three-storey kindergarten building is analyzed. There are considered two limiting cases of heat exchange with room walls: isothermal and adiabatic. The calculation is carried out for the characteristic parameters of residential and administrative buildings (where fire occurs).

The solution of the system of 7 transcendental equations was carried out by Seidel method for two limiting cases: adiabatic and isothermal. The temperature values were close (the difference was $\approx 0.5\%$).

Keywords: *radiation flow, fire controlled by ventilation, adiabatic temperature, heat exchange with walls*

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. E-mail: K708@yandex.ru

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