

Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении

© Л.Т. Танклевский¹, И.А. Бабилов¹, А.А. Таранцев^{2,3}✉, О.А. Зыбина¹

- 1 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
- 2 Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13)
- 3 Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема быстрого определения координат пожара в помещении является весьма актуальной для своевременного осуществления принудительной активации оросителей. Решению данной проблемы посвящен ряд работ, в частности приведен способ графоаналитического определения координат (x_0, y_0) очага пожара в помещении.

Теоретическая часть. Разработанный авторами метод дает возможность определить координаты пожара благодаря показаниям N термодатчиков. Метод обладает следующими особенностями:

а) основывается на модели пожара, полученной Р. Альпертом для помещений, и свидетельствует о том, что нужно учитывать не просто температуру, фиксируемую термодатчиками, а значение этой температуры в *третьей степени*;

б) позволяет определить координаты очага пожара не только по приращению температуры, но и по скорости ее роста, причем результат в обоих случаях будет практически одинаковым и не зависящим ни от высоты помещения, ни от времени, ни от формы пожара.

Компьютерный эксперимент. Для верификации полученного выражения был проведен компьютерный эксперимент на примере помещения склада. Для двух вариантов пожара А и Б с применением модели Р. Альперта и заданными координатами очагов, используя специально разработанную компьютерную программу, были смоделированы динамика прироста температуры $\Delta T(t)$ и скорости ее изменения.

Натурный эксперимент. В работе приведены результаты натурального эксперимента, при котором были зарегистрированы данные с 16 термопар, показывающие распространение теплового поля пожара. С использованием этих данных в компьютерной программе стало возможным определить координаты пожара, соответствующие реальному местоположению очага.

Выводы. На основе полученного выражения можно оперативно, с приемлемой достоверностью определять координаты очага пожара, что позволяет принудительно активировать один, два или три оросителя, которые способны подавить пожар на самой ранней стадии с минимальным количеством расходуемого огнетушащего вещества.

Ключевые слова: ороситель; термодатчик; спринклерная автоматическая установка пожаротушения; пожарная безопасность; принудительная активация.

Для цитирования: Танклевский Л.Т., Бабилов И.А., Таранцев А.А., Зыбина О.А. Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 33–43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43

✉ Таранцев Александр Алексеевич, e-mail: info@iptran.ru

On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises

© Leonid T. Tanklevskiy¹, Igor A. Babikov¹, Alexander A. Tarantsev^{2,3}✉, Olga A. Zyбина¹

- 1 Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)
- 2 Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)
- 3 Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The problem of quick identification of fire coordinates in the premises is particularly relevant electrical activation. A number of authors focus on this problem, in particular, they analyze the method of graphic and analytic positioning (x_0, y_0) of the fire seat in the premises.

Theoretical Part. The method developed by the authors makes it possible to identify the coordinates of a fire by reading N values of temperature sensors. The method has the following features:

a) it is based on the fire model obtained by R. Alpert for premises, and shows that it is necessary to take into account not just the temperature read by temperature sensors, but the value of this temperature in third power;

b) it allows you to determine the coordinates of the seat of fire, not only by the increase in temperature, but also by the speed of its growth, and the result in both cases will be almost the same and independent of either the height of the premises, or time, or the form of fire.

Computer Experiment. To verify the obtained expression, a computer experiment was carried out using the example of a warehouse. For two A and B fire variants using R. Alpert model and the specified coordinates of the fronts, using a specially developed computer program, the dynamics of temperature increase $\Delta T(t)$ and the rate of its change were simulated.

Full-Scale Experiment. The paper presents the results of a full-scale experiment in which data from 16 thermocouples showing the spread of the thermal field of fire were registered. Using this data in the computer program it was possible to set the coordinates of the fire that corresponded to the real location of the seat of fire.

Conclusions. On the basis of the obtained expression it is possible to set quickly, with acceptable reliability, the coordinates of the seat of fire, which allows to forcefully activate one, two or three sprinklers that are able to fight the fire at the earliest stage with the minimum flow of fire extinguishing agent.

Keywords: sprinkler; temperature sensor; sprinkler automatic fire-fighting system; fire safety; electrical activation

For citation: Tanklevskiy L.T., Babikov I.A., Tarantsev A.A., Zybins O.A. On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):33-43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43

✉ Alexander Alexeevich Tarantsev, e-mail: info@iptran.ru

Введение

Спринклерные автоматические установки пожаротушения (АУП)¹ являются важной составляющей противопожарной защиты объектов различных классов функциональной пожарной опасности²: складов со стеллажным хранением продукции [1, 2], автостоянок [3, 4], тоннелей [5] и др.

Исторически как в СССР/РФ [6–18], так и за рубежом [19–26] большое внимание уделялось борьбе с пожарами в помещениях, в частности, с использованием АУП.

Как показано в работах [27, 28], чем раньше будет обнаружено возгорание, тем раньше может быть активирована АУП и тем быстрее пожар может быть подавлен без излишнего расходования огнетушащего вещества, которое может являться сопутствующим опасным фактором пожара для защищаемого объекта. Данное условие предопределяет эффективность АУП [29] и пути ее повышения [30], применение новых материалов [31], особенно при гидравлических расчетах [32, 33] и др.

В этой связи проблема быстрейшего определения координат очага пожара в помещении является весьма актуальной в целях принудительной активации именно тех оросителей (или даже одного оросителя), на защищаемой площади которых находится этот очаг.

Решению данной проблемы посвящен ряд работ, в частности, в [34] приведен способ графоаналитического определения координат (x_o, y_o) очага

пожара класса А в помещении, а в работе [35] — выражение для средневзвешенного экспресс-нахождения этих координат по значениям температур $\{T_i\}$, получаемых от N термодатчиков:

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (1)$$

где x_i, y_i — координаты i -го термодатчика.

Тем не менее представляется необходимым разработать уточненный подход к определению координат (x_o, y_o) , который может быть использован в системе управления принудительным пуском АУП, а также в системе видеоконтроля помещений объекта.

Теоретическая часть

Уточненный метод определения координат очага пожара должен базироваться на известных адекватных моделях развития пожара [36–40]. По мнению авторов, наиболее приемлемой является модель, представленная в [40], аналитически связывающая приращение температуры ΔT , °С, в припотолочной области помещения высотой H , м, с тепловой мощностью Q , кВт, очага пожара класса А. В рамках оговоренных там допущений приращение температуры ΔT на расстоянии R от оси конвективной колонки (ее нижняя точка и является центром очага пожара с координатами (x_o, y_o)) может быть найдено из выражения:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{5,3472}{H} \left(\frac{Q}{R} \right)^{2/3}, \quad R > 0,179H, \quad (2)$$

где T и T_0 — соответственно текущая и начальная (до возгорания) температуры в припотолочной

¹ СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

области на расстоянии R от оси конвективной колонки, °С.

Величина Q , в свою очередь, может быть оценена по выражению:

$$Q = k_{\phi} q (Vt)^m, \quad (3)$$

где k_{ϕ} , m — параметры формы площади пожара, при круговой форме пожара $k_{\phi} = \pi$, $m = 2$;

при пожаре в коридоре шириной a $m = 1$, $k_{\phi} = a$ при распространении пожара в одну сторону, $k_{\phi} = 2a$ при распространении пожара в обе стороны;

t — текущее время, отсчитываемое от начала возгорания, с;

q — удельная тепловая мощность пожара, кВт/м²;

V — линейная скорость распространения фронта пламени, м/с (например, согласно [41], для жилых помещений, гостиниц, общежитий $q = 184,2$ кВт/м², $V = 0,0045$ м/с).

С учетом выражений (2) и (3) может быть найдена скорость роста температуры в припотолочной области на расстоянии R от оси конвективной колонки при $R > 0,179H$:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= 3,5648 \frac{m}{H} \left(\frac{k_{\phi} q V^m}{R} \right)^{2/3} t^{(2m-3)/3} = \\ &= 3,5648 \frac{m}{Ht} \left(\frac{Q}{R} \right)^{2/3}. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае пожара круговой формы выражение (4) приводится к виду:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{15,2932}{H} \left(\frac{qV^2}{R} \right)^{2/3} t^{1/3} = \frac{7,1296}{Ht} \left(\frac{Q}{R} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

Применительно к i -му термодатчику с координатами (x_i, y_i) выражения (2) и (4) можно записать в виде:

$$Q_i^2 = R_i^2 \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right], \quad (6)$$

где $k_1 \approx 0,00654H^3$; $k_2 \approx 0,02207(Ht/m)^3$;
 $= (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$ — квадрат расстояния от i -го термодатчика до оси конвективной колонки.

Параметр Q_i в выражении (6) можно интерпретировать как условную мощность очага пожара, регистрируемую i -ым термодатчиком, когда он «не знает» координат очага пожара. Выражение (6) можно по аналогии с *методом наименьших квадратов* [42] использовать для определения координат очага пожара (x_0, y_0) из условия:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N Q_i^2 &= \sum_{i=1}^N [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2] \times \\ &\times \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] \rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

где N — число учитываемых термодатчиков.

Взяв от (7) частные производные по x и y , получаем систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_0} \sum_{i=1}^N Q_i^2 = 2 \sum_{i=1}^N (x_i - x_0) \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] = \\ = 2 \sum_{i=1}^N x_i \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] - 2x_0 \sum_{i=1}^N \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial y_0} \sum_{i=1}^N Q_i^2 = 2 \sum_{i=1}^N (y_i - y_0) \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] = \\ = 2 \sum_{i=1}^N y_i \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right] - 2y_0 \sum_{i=1}^N \left[\frac{k_1 \Delta T_i^3}{k_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3} \right]. \end{cases} \quad (8)$$

Приравняв (8) и (9) к нулю и решив относительно x_0 и y_0 , получаем:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \left[\Delta T_i^3; \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3 \right]}{\sum_{i=1}^N \left[\Delta T_i^3; \left(\frac{dT}{dt} \right)_i^3 \right]}. \quad (10)$$

Выражение (10), как нетрудно увидеть, является уточняющим развитием известного выражения (1) и имеет следующие особенности:

а) основывается на модели пожара, полученной Р. Альпертом [40] для помещений, и свидетельствует о том, что нужно не просто учитывать температуру термодатчиков, а их температуру в *третьей степени*;

б) позволяет определить координаты очага пожара не только по приращению температуры, но и по скорости ее роста, причем результат в обоих случаях будет практически одинаковым и не зависящим ни от высоты помещения (важно только выполнение условия $R > 0,179H$), ни от времени, ни от формы пожара.

Компьютерный эксперимент

Для верификации выражения (10) был проведен компьютерный эксперимент на примере помещения склада ($q = 372,8$ кВт/м²; $V = 0,01$ м/с) высо-

Таблица 1. Координаты термодатчиков и расстояния от них до осей конвективных колонок при вариантах пожара А и Б
Table 1. Coordinates of temperature sensors and distances from them to the axes of convective columns in fire variants A and B

Пространственные параметры датчиков Sensor space parameters	Номер i -го датчика i sensor number									Примечание Note
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$x_i, \text{ м}$ $x_i, \text{ m}$	1,5	4,5	7,5	1,5	4,5	7,5	1,5	4,5	7,5	—
$y_i, \text{ м}$ $y_i, \text{ m}$	7,5			4,5			1,5			—
$R_i^A, \text{ м}$ $R_i^A, \text{ m}$	5,6	5,9	7,4	2,7	3,2	5,6	1,1	2,1	5,0	Вариант А Variant A
$R_i^B, \text{ м}$ $R_i^B, \text{ m}$	4,0	2,1	3,2	3,6	1,1	2,7	5,3	4,0	4,7	Вариант Б Variant B

той $H = 5 \text{ м}$ с начальной температурой $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, в припотолочной части которого размещены девять термодатчиков для измерения температуры и скорости ее изменения. Схема размещения термодатчиков приведена на рис. 1, их координаты — в табл. 1.

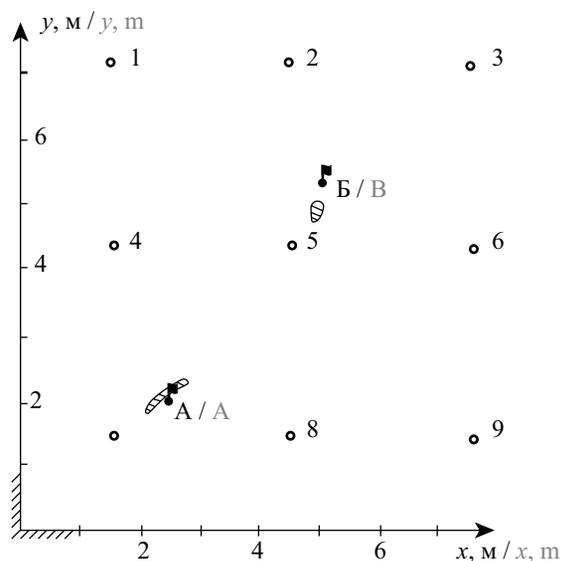


Рис. 1. Схема размещения девяти термодатчиков в припотолочной зоне помещения и тестовые очаги вариантов пожаров А и Б

Fig. 1. Layout of nine temperature sensors in the ceiling area of the premises and test centers of A and B fire variants

С применением модели Р. Альперта [40] и специально разработанной компьютерной программы по выражениям (2), (3) и (5) для двух вариантов пожара А и Б с координатами очагов $(2,5 \text{ м}; 2,0 \text{ м})_A$ и $(5,0 \text{ м}; 5,5 \text{ м})_B$ были смоделированы динамика прироста температуры $\Delta T_i(t)$ и скорости ее

изменения. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, для варианта пожара А термодатчики по степени убывания нагрева можно расположить в последовательности: 7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, 3, а для варианта Б в последовательности: 5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, 7. С учетом этого и данных табл. 2 по выражению (10) для различных сочетаний датчиков были определены вероятные координаты очагов пожара (x_0, y_0) , которые приведены в табл. 3 и представлены на рис. 1 (заштрихованные области), а также на рис. 2 и 3 в увеличенном масштабе.

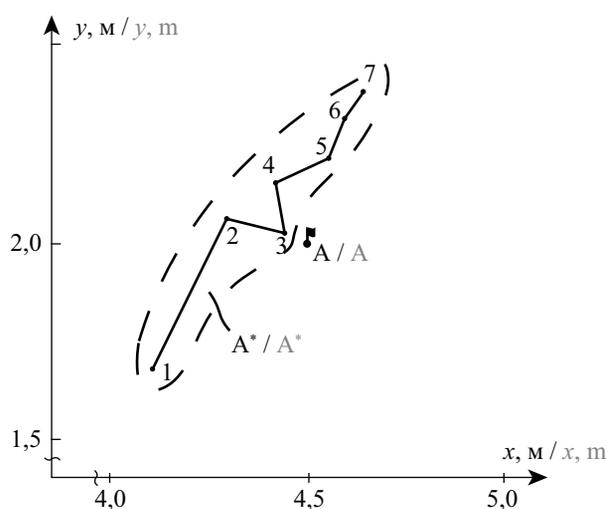


Рис. 2. Результаты определения координат очага пожара А (цифры в области A^* соответствуют номеру расчета в первом столбце табл. 3). Флажком обозначен очаг пожара

Fig. 2. The results of setting the coordinates of the seat of fire A (the digits in the area A^* correspond to the number of the calculation in the first column of the table 3). The flag indicates the seat of fire

Таблица 2. Значения прироста температуры и скорости ее изменения для вариантов пожара А и Б на 60-й секунде пожара
Table 2. Temperature increase and rate of change values for fire variants A and B at 60th second of fire

Параметр Parameter	Номера датчиков Sensor numbers									Вариант Variant
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	39,2	38,6	35,9	51,2	47,8	39,2	76,1	57,3	40,6	А
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,455	0,441	0,376	0,740	0,659	0,455	1,330	0,884	0,488	А
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	43,9	57,3	47,8	45,5	76,1	51,2	39,8	43,9	41,5	Б
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,565	0,884	0,659	0,605	1,330	0,740	0,470	0,565	0,509	Б

Таблица 3. Результаты определения вероятных координат очагов пожаров А и Б
Table 3. Results of determination of probable coordinates of fire seats A and B

Вариант А / Variant A				Вариант Б / Variant B			
№ No.	Учитываемые датчики Recordable sensors	$x_o, \text{ м}$ $x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м}$ $y_o, \text{ m}$	№ No.	Учитываемые датчики Consider the sensors	$x_o, \text{ м}$ $x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м}$ $y_o, \text{ m}$
1	7, 8, 4, $N=3$	2,10	1,85	1	5, 2, 6, $N=3$	4,85	5,10
2	7, 8, 4, 5, $N=4$	2,29	2,06	2	5, 2, 6, 3, $N=4$	5,06	5,29
3	7, 8, 4, 5, 9, $N=5$	2,44	2,04	3	5, 2, 6, 3, 4, $N=5$	4,86	5,24
4	7, 8, 4, 5, 9, 1, $N=6$	2,42	2,17	4	5, 2, 6, 3, 4, 1, $N=6$	4,71	5,34
5	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, $N=7$	2,54	2,22	5	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, $N=7$	4,70	5,18
6	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, $N=8$	2,58	2,33	6	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, $N=8$	4,78	5,07
7	7, 8, 4, 5, 9, 1, 6, 2, 3, $N=9$	2,64	2,40	7	5, 2, 6, 3, 4, 1, 8, 9, 7, $N=9$	4,71	4,99

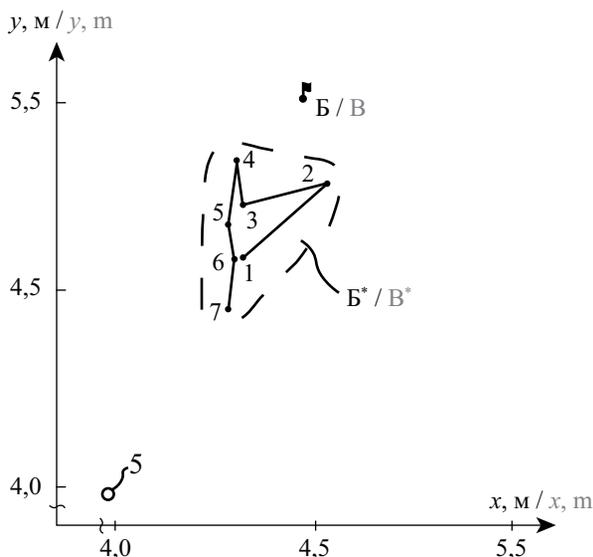


Рис. 3. Результаты определения координат очага пожара Б (цифрам в области Б* соответствуют номера расчетов в пятом столбце табл. 3), цифрой «5» указан номер термодатчика, соответствующий рис.1, флажком обозначен очаг пожара
Fig. 3. The results of setting the coordinates of the seat of fire B (the digits in the area B* correspond to the number of calculations in the fifth column of Table 3), the digit “5” indicates the number of the temperature sensor corresponding to Fig. 1, the flag indicates the seat of fire

Как видно из рис. 1, рассчитанные по выражению (10) координаты очагов пожаров достаточно хорошо совпадают с тестовыми. При этом как по величинам повышения температуры $\{\Delta T_i\}$, так и скорости ее роста $\{dT_i/dt\}$, результаты оценки координат очагов пожаров одинаковы. В случае варианта пожара А должен быть активирован ороситель у датчика 7, а при варианте пожара Б — ороситель у датчика 5.

В то же время, использование данных всех термодатчиков вряд ли рационально, целесообразно учитывать только наиболее нагретые.

Натурный эксперимент

Для решения задач, связанных с определением координат пожара по результатам показаний термодатчиков, полученных в ходе натуральных экспериментов, термодатчики в количестве 16 шт. располагались в припотолочной области с шагом 1 м (рис. 4) на высоте 4 и 8 м, пожарной нагрузкой являлись листы картона $1,8 \times 1,8$ м (рис. 5) и картонные коробки. В ходе экспериментов всеми термодатчиками регистрировались значения температуры $\{\Delta T_1, \dots, \Delta T_{16}\}$ с частотой 18 с (рис. 6), тушение не проводилось.

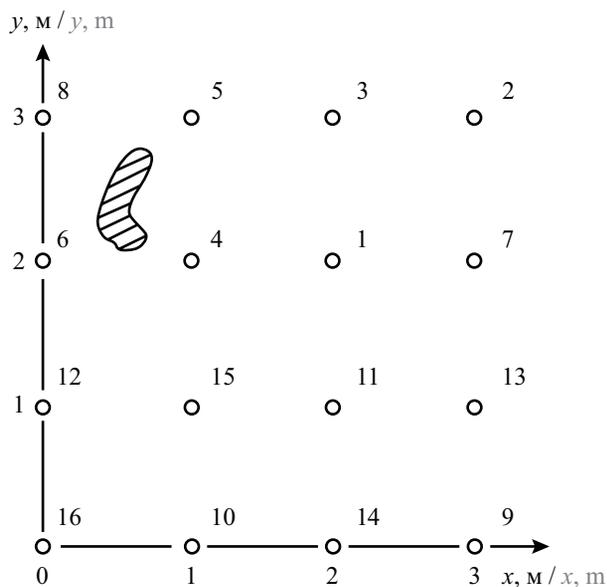


Рис. 4. Схема размещения 16-ти термодатчиков в припотолочной зоне испытательной лаборатории ВНИИПИИ. Заштрихованная область — рассчитанные по выражению (10) координаты очага пожара по результатам обработки экспериментальных данных

Fig. 4. Layout of 16 temperature sensors in the ceiling area of the VNIIPII (All-Russian Research, Design and Survey Institute) testing laboratory. Shaded area is calculated using the expression (10) coordinates of the fire seat according to the results of experimental data processing



Рис. 5. Эксперимент по воспламенению пожарной нагрузки (картонных листов $1,8 \times 1,8$ м) в испытательной лаборатории ВНИИПИИ

Fig. 5. Fire load ignition experiment (cardboard sheets 1.8×1.8 m) in the testing laboratory of VNIIPII

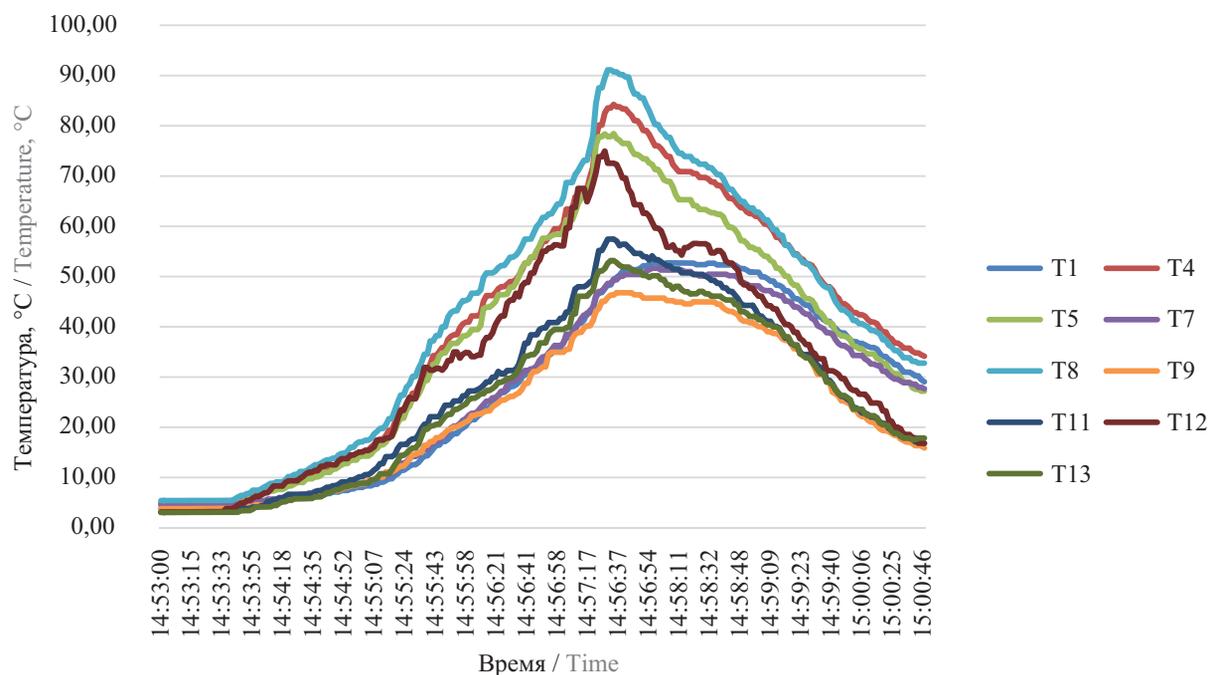


Рис. 6. Пример результатов регистрации температуры в ходе одного из экспериментов (воспламенение картонных листов размером $1,8 \times 1,8$ м, высота установки термодатчиков — $H = 4$ м)

Fig. 6. Example of results of temperature registration during one of the experiments (ignition of cardboard sheets with the size of 1.8×1.8 m, installation height of temperature sensors $H = 4$ m)

Таблица 4. Результаты обработки результатов испытаний в ВНИИПИИ

Table 4. Results of processing the test results at VNIPII

Номер термодатчика Sensor number	8	4	5	12	6	10	16	11	3	13
$\Delta T_i, ^\circ\text{C}$	39,02	34,82	32,82	30,62	25,41	24,37	22,72	22,15	21,52	20,89
$dT_i/dt, ^\circ\text{C}/\text{c}$	0,947	0,847	0,796	0,643	0,557	0,567	0,531	0,523	0,511	0,514

Таблица 5. Спрогнозированные координаты пожара

Table 5. The predicted coordinates of the fire

№ No.	Учитываемые датчики Recordable sensors	Определение координат очага пожара Setting the coordinates of the fire seat			
		по $\{\Delta T_i\}$ / by $\{\Delta T_i\}$		по $\{dT_i/dt\}$ / by $\{dT_i/dt\}$	
		$x_o, \text{ м} / x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м} / y_o, \text{ m}$	$x_o, \text{ м} / x_o, \text{ m}$	$y_o, \text{ м} / y_o, \text{ m}$
1	8, 4, 5, $N=3$	0,57	2,69	0,57	2,69
2	8, 4, 5, 12, $N=4$	0,47	2,40	0,50	2,49
3	8, 4, 5, 12, 6, $N=5$	0,43	2,36	0,46	2,45
4	8, 4, 5, 12, 6, 10, $N=6$	0,47	2,19	0,50	2,28
5	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, $N=7$	0,44	2,07	0,47	2,16
6	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, $N=8$	0,52	2,01	0,55	2,10
7	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, $N=9$	0,58	2,06	0,61	2,14
8	8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, 13, $N=10$	0,68	2,02	0,72	2,09

Результаты экспериментов обрабатывались с помощью компьютерной программы, реализующей выражение (10). В частности, для примера, приведенного на рис. 6, установлено, что наиболее нагретыми являются следующие термодатчики: 8, 4, 5, 12, 6, 10, 16, 11, 3, 13. В табл. 4 приведены данные о величинах $\{\Delta T_i\}$ и $\{dT_i/dt\}$ для 30-й секунды пожара, табл. 5 — спрогнозированные по выражению (10) координаты очага пожара.

Полученные таким путем координаты очага (x_o, y_o) приведены на рис. 4 в виде заштрихованной области, на рис. 7 — в укрупненном масштабе. Из полученных оценок координат очага следует, что в первую очередь должны быть активированы три спринклера, расположенные у датчиков 4–6.

Некоторую размытость области оценок координат (x_o, y_o) можно объяснить фактом выгорания центра пожарной нагрузки и последующего горения по ее периметру.

Выводы

Использование полученного в ходе исследования выражения (10) дает возможность оперативно, с приемлемой достоверностью определять координаты очага пожара, что позволяет принудительно активировать один, два или три оросителя, которые способны подавить пожар на самой ранней

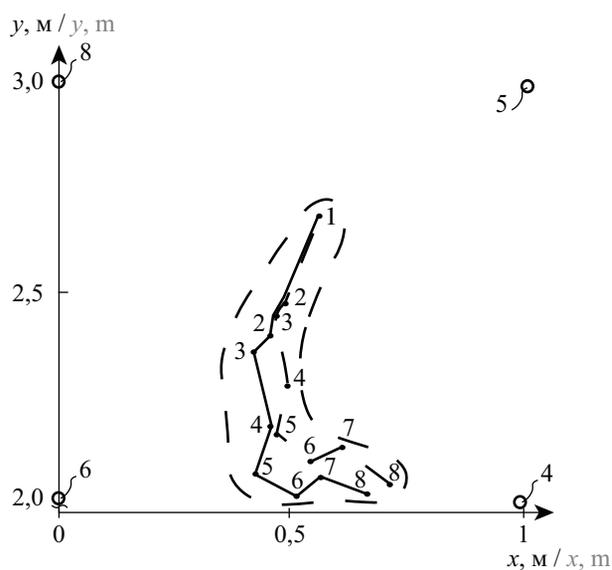


Рис. 7. Результаты определения координат очага пожара (цифры соответствуют номерам расчетов в первом столбце табл. 4, сплошные линии — ΔT_i , пунктирные линии — dT_i/dt), цифрами «4», «5» и «6» указаны номера термодатчиков в соответствии с рис. 4

Fig. 7. Results of setting the coordinates of the fire seat (the digits correspond to the numbers of calculations in the first column of table 4, full lines – ΔT_i , dotted lines – dT_i/dt), numbers “4”, “5” and “6” indicate the numbers of temperature sensors according to Fig. 4

стадии с минимальным количеством расходуемого огнетушащего вещества. Выражение (10) хорошо алгоритмируется и может применяться в системах управления спринклерных автоматических установок пожаротушения.

В дальнейшем могут быть проведены исследования по совершенствованию выражения (10) в части уточнения степени прироста температуры, введения весовых коэффициентов термодатчиков и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L.* Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1107. Issue 4. P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
2. *Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L.* Fire growth in a high-rack storage // *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2019. Vol. 2. Pp. 796–807. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
3. *Дорожкин А.С., Таранцев А.А., Минкин Д.Ю.* Проблема пожарной безопасности подземных автостоянок // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2015. № 1 (33). С. 13–18.
4. *Таранцев А.А., Шидловский Г.Л., Потапов Д.А.* Особенности распространения опасных факторов пожара в подземных стоянках автомобилей // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2020. № 1 (53). С. 43–52.
5. *Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A.* Advantages of Electronically Controlled Sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels // *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012*. 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
6. *Родэ А.А., Иванов Е.Н., Климов Г.В.* Автоматические установки для тушения пожаров. М. : Стройиздат, 1965. 187 с.
7. *Ходаков В.Ф.* Автоматические установки водяного пожаротушения. Киев : Будівельник, 1970. 92 с.
8. *Бубурь Н.Ф., Иванов А.Ф., Бабуров В.П., Мангасаров В.И.* Установки автоматической противопожарной защиты : учеб. пособие для пожарно-техн. училищ. М. : Стройиздат, 1979. 176 с.
9. *Болотин Е.Т., Мажара И.И., Пестмаль Н.Ф.* Проектирование установок автоматического пожаротушения. Киев : Будівельник, 1980. 116 с.
10. *Бубурь Н.Ф., Воробьев Р.П., Быстров Ю.В., Зуйков Г.М.* Эксплуатация установок пожарной автоматики. М. : Стройиздат, 1986. 367 с.
11. *Агафонов В.В., Копылов Н.П.* Установки аэрозольного пожаротушения: элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. М. : ВНИИПО, 1999. 232 с.
12. *Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Аleshин В.В., Губин Р.Ю.* Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
13. *Собурь С.В.* Установки пожаротушения автоматические : справочник. М. : Спецтехника, 2003. 400 с.
14. *Сафронов В.В., Аксенова Е.В.* Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации : учеб. пособие. Орел : ОрелГТУ, 2004. 57 с.
15. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика : учеб. пособие. Омск : Издательство ОмГТУ, 2013. 152 с.
16. *Собурь С.В.* Установки пожарной сигнализации : учебно-справочное пособие. М. : Пожкнига, 2015. 256 с.
17. *Воронков О.Ю.* Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения : учеб. пособие. Омск : Издательство ОмГТУ, 2016.
18. *Илюшов Н.Я.* Автоматические установки пожаротушения : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
19. *Mitchell N.D.* New Light on Self-Ignition // *Quarterly of the National Fire Protection Association*. 1951. Vol. 45. Issue 2. Pp. 165–172.
20. *Rasbash D.J.* The extinction of fires by water sprays // *Fire Research Abstracts and Reviews*. 1962. Vol. 4. Pp. 28–52.
21. *Williams F.A.* A unified view of fire suppression // *Journal of Fire and Flammability*. 1974. Vol. 5. Pp. 54–63.
22. *Bryan J.L.* Fire suppression and detection systems. Beverley Hills, California : Glencoe Press, 1974. 409 p.
23. *Yao C.* Development of large-drop sprinklers // *FMRC Technical Report Serial No. 22476*. Norwood, MA : Factory Mutual Research Corporation, 1976.
24. *Bullen M.L.* The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling // *Fire Technology*. 1977. No. 13. Pp. 21–34. DOI: 10.1007/BF02338883
25. *Yao C.* Application of sprinkler technology // *Workshop on Engineering Applications of Fire Technology held at the National Bureau of Standards*. 1980.
26. *Fire protection handbook: Fifteenth Edition*. National Fire Protection Association, 1981. 50 p.

27. Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A. Electrically controlled dynamic sprinkler activation: Computational assessment of potential efficiency // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 91. Pp. 614–623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
28. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013 (Royal Holloway College University of London, UK, 24–26 June)*. 2013. Pp. 503–508.
29. Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Мешман Л.М. Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // *Пожарная безопасность*. 2015. № 1. С. 72–79.
30. Королева Л.А., Таранцев А.А., Груданова О.В. Об экономической оценке двух путей модернизации установок пожаротушения // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2007. № 1. С. 38–42.
31. Мешман Л.М., Снегирев А.Ю., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. О возможности использования пластиковых труб в спринклерных установках автоматического пожаротушения // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 10. С. 73–78.
32. Артамонов В.С., Груданова О.В., Таранцев А.А. Уточненный порядок расчета одноуровневых разветвленных гидравлических сетей // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2008. Т. 17. № 3. С. 77–83.
33. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS // *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. 2013. Pp. 482–491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
34. Бабиков И.А., Танклевский А.Л., Таранцев А.А. О способе определения группы принудительно активируемых оросителей при возникновении пожара в помещении // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2019. № 3 (51). С. 34–41.
35. Xin Y., Burchesky K., De Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — part 1: system design and function evaluation // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
36. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Chichester : John Wiley & Sons, 1985. 440 p.
37. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. The macrokinetics of indoor fire // *High Temperature*. 1998. Vol. 36. Issue 5. Pp. 737–743.
38. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition // *High Temperature*. 1998. Vol. 36. Issue 6. Pp. 949–959.
39. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 108. P. 102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
40. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy : National Fire Protection Association, 2002. Pp. 2-18–2-31.
41. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М. : ВНИИПО МЧС России, 2012.
42. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгис, 1962. 349 с.

REFERENCES

1. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1107(4):042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
2. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Fire growth in a high-rack storage. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 2019; 2:796–807. DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
3. Dorozhkin A.S., Tarantsev A.A., Minkin D.Yu. Problems of fire safety underground parking. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2015; 1(33):13-18. (rus.).
4. Tarantsev A.A., Shidlovsky G.L., Potashev D.A. Features of the spread of fire hazards in underground parking lots. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2020; 1(53):43-52. (rus.).
5. Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of Electronically Controlled Sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012*. 2012; 1:87-92.
6. Rode A.A., Ivanov E.N., Klimov G.V. *Automatic systems for fire extinguishing*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965; 187. (rus.).
7. Khodakov V.F. *Automatic systems for water fire extinguishing*. Kiev, Budivel'nik, 1970; 92. (rus.).

8. Bubyr N.F., Ivanov A.F., Baburov V.P., Mangasarov V.I. *Installations of automatic fire protection: study guide for fire-technical schools*. Moscow, Stroyizdat, 1979; 176. (rus.).
9. Bolotin E.T., Mazhara I.I., Pestmal N.F. *Design of automatic fire extinguishing systems*. Kiev, Budivelnik, 1980; 116. (rus.).
10. Bubyr N.F., Vorobyev R.P., Bystrov Yu.V., Zuykov G.M. *Operation of fire automatics*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 367. (rus.).
11. Agafonov V.V., Kopylov N.P. *Aerosol fire extinguishing installations: elements and characteristics, design, installation and operation*. Moscow, VNIPO Publ., 1999; 232. (rus.).
12. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Yu. *Design of water and foam automatic fire extinguishing systems*. Moscow, VNIPO of EMERCOM of Russia, 2002; 413. (rus.).
13. Sobur S.V. *Automatic fire extinguishing installations: handbook*. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2003; 400. (rus.).
14. Safronov V.V., Aksenova E.V. *The selection and calculation of parameters of fire extinguishing and alarm systems: study guide*. Orel, Orel State Technical University Publ., 2004; 57. (rus.).
15. Khrapskiy S.F., Starikov V.I., Rysev D.V. *Industrial and fire automatics: study guide*. Omsk, OmSTU Publ., 2013; 152. (rus.).
16. Sobur S.V. *Fire alarm systems: study guide*. Moscow, Pozhkniga Publ., 2015; 256. (rus.).
17. Voronkov O.Yu. *Calculation, installation and operation of automatic fire extinguishing systems*. Omsk, OmSTU Publ., 2016. (rus.).
18. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing systems: study guide*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016; 134. (rus.).
19. Mitchell N.D. New Light on Self-Ignition. *Quarterly of the National Fire Protection Association*. 1951; 45(2):165-172.
20. Rasbash D.J. The extinction of fires by water sprays. *Fire Research Abstracts and Reviews*. 1962; 4:28-52.
21. Williams F.A. A unified view of fire suppression. *Journal of Fire and Flammability*. 1974; 5:54-63.
22. Bryan J.L. *Fire Suppression and Detection Systems*. Beverley Hills, California, Glencoe Press, 1974; 409.
23. Yao C. Development of large-drop sprinklers. *FMRC Technical Report Serial No. 22476*. Norwood, MA, Factory Mutual Research Corporation, 1976.
24. Bullen M.L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. *Fire Technology*. 1977; 13:21-34. DOI: 10.1007/BF02338883
25. Yao C. Application of sprinkler technology. *Workshop on Engineering Applications of Fire Technology held at the National Bureau of Standards*. 1980.
26. *Fire Protection Handbook: Fifteenth Edition*. National Fire Protection Association, 1981; 50.
27. Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A. Electrically controlled dynamic sprinkler activation: Computational assessment of potential efficiency. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:614-623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
28. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation. *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013 (Royal Holloway College University of London, UK, 24-26 June)*. 2013; 503-508.
29. Tarantsev A.A., Tanklevskiy L.T., Snegirev A.Yu., Tsoy A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Fire Safety*. 2015; 1:72-79. (rus.).
30. Koroleva L.A., Tarantsev A.A., Grudanova O.V. On the economic assessment of two ways to modernize fire extinguishing installations. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2007; 1:38-42. (rus.).
31. Meshman L.M., Snegirev A.Yu., Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A. On the possibility of the use of plastic pipes sprinkler automatic fire extinguishing installations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(10):73-78. (rus.).
32. Artamonov V.S., Grudanova O.V., Tarantsev A.A. Refined calculation procedure for single level branched hydraulic networks. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(3):77-83. (rus.).
33. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS. *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. 2013; 482-491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
34. Babikov I.A., Tanklevskiy A.L., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2019; 3(51):34-41. (rus.).
35. Xin Y., Burchesky K., De Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — part 1: system design and function evaluation. *Fire Technology*. 2017; 53:1847-1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
36. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester, John Wiley & Sons, 1985; 440.
37. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. The macrokinetics of indoor fire. *High Temperature*. 1998; 36(5):737-743.
38. Snegirev A.Yu., Tanklevskii L.T. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition. *High Temperature*. 1998; 36(6):949-959.

39. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102825. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2019.102825
40. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, National Fire Protection Association, 2002; 2-18-2-31.
41. *The application manual of "Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire hazard"*. Moscow, VNIPO of EMERCOM of Russia, 2012. (rus.).
42. Linnik Yu.V. *The least squares method and the basics of the mathematical-statistical theory of observation processing*. Moscow, Fizmatgis Publ., 1962; 349. (rus.).

*Поступила 15.04.2020, после доработки 07.05.2020;
принята к публикации 29.05.2020*

*Received April 15, 2020; Received in revised form May 7, 2020;
Accepted May 29, 2020*

Информация об авторах

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 181476, ResearcherID: S-1901-2017; Scopus Author ID: 57192367552; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

БАБИКОВ Игорь Александрович, аспирант Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 949758, ResearcherID: S-5502-2017; Scopus Author ID: 57205082476; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 664653, ResearcherID: K-2087-2018; Scopus Author ID: 57195636448; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: info@iptran.ru

ЗЫБИНА Ольга Александровна, д-р техн. наук, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Author ID: 505657, ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus Author ID: 6504571187, e-mail: zybina_oa@spbstu.ru

Information about the authors

Leonid T. TANKLEVSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 181476, ResearcherID: S-1901-2017; Scopus Author ID: 57192367552; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

Igor A. BABIKOV, Graduate Student of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 949758, ResearcherID: S-5502-2017; Scopus Author ID: 57205082476; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; Professor; Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 664653, ResearcherID: K-2087-2018; Scopus Author ID: 57195636448; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: info@iptran.ru

Olga A. ZYBINA, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of the Higher school of technosphere safety, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; Author ID: 505657, ORCID: 0000-0001-9401-7206; ResearcherID: Q-4451-2017; Scopus Author ID: 6504571187, e-mail: zybina_oa@spbstu.ru