

О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками

© Л.Т. Танклевский^{1,2}, А.А. Таранцев^{2,3✉}, И.А. Бабилов¹, Д.В. Поляков⁴

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

² Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)

³ Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13)

⁴ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема своевременной активации спринклерной установки пожаротушения является весьма актуальной для эффективного тушения пожара до наступления критического момента, при котором тушение в расчетных объемах станет невозможным. Решению проблемы эффективного применения спринклерной установки при пожаре класса А посвящен ряд работ. Вопрос применения таких методик при пожаре класса В ранее рассмотрен не был.

Модель пожара в помещении с автоматической установкой пожаротушения (АУП). Разработанная авторами модель оценки времени срабатывания спринклерной автоматической установки водяного пожаротушения при пожаре класса В дает возможность определить скорость распространения пламени по поверхности розлива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ) и определить скорость нарастания температуры в пипотолочной области.

Активация спринклера от теплового разрушения колбы восходящим конвективным потоком. Разработана модель определения времени срабатывания спринклерной установки пожаротушения от воздействия теплового потока пожара класса В на термочувствительную колбу оросителя.

Активация спринклерной АУП от дифференциального теплового пожарного извещателя (ДТПИ). Разработана модель определения времени срабатывания ДТПИ.

Примеры. Дан ряд примеров по практическому определению времени срабатывания спринклерных установок пожаротушения традиционного типа, дренчерных или с принудительным пуском.

Выводы. На основе полученного выражения можно оперативно, с приемлемой достоверностью определять возможность применения той или иной установки спринклерного пожаротушения для обеспечения эффективной защиты помещений, в которых возможно возникновение пожаров класса В.

Ключевые слова: спринклерный ороситель; активация; дифференциальный тепловой пожарный извещатель; критическая высота; розлив ЛВЖ

Для цитирования: Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А., Поляков Д.В. О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 88–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.88-98

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

Calculated assessment of effectiveness of class B fire suppression using automatic fire sprinkler systems

© Leonid T. Tanklevskiy^{1,2}, Alexander A. Tarantsev^{2,3✉}, Igor A. Babikov¹, Dmitriy V. Polyakov⁴

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

² Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

³ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences (12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)

⁴ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The problem of timely activation of fire sprinkler systems is highly relevant for effective fire suppression before the critical moment, when calculated values applied to extinguish the fire, become ineffective. A number of works address the problem of effective application of the fire sprinkler system to Class A fires. The application of such methods to Class B fires has not yet been considered.

The model simulating a fire in a room with an automatic fire extinguishing system. The response time assessment model, developed by the co-authors for an automatic water-consuming fire sprinkler system, allows to identify the velocity of flame spreading over the surface of an HFL/CL spillage and the temperature rise rate in the ceiling area in the case of a B class fire.

A sprinkler is triggered by the bulb bursting caused by the thermal effect produced by the ascending convection flow. A model has been developed to determine the response time of a fire sprinkler system exposed to the effect of a heat flow, caused by the Class B fire, on a heat-sensitive sprinkler bulb.

Activation of a fire sprinkler system by the rate-of-rise heat detector. A model, designated for determining the activation time of a rate-of-rise heat detector, was developed.

Examples. A number of examples, illustrating the response time of traditional, deluge, and forced launch fire sprinkler systems, are provided in the article.

Conclusions. The obtained formula allows to quickly check the applicability of different types of fire sprinkler systems to ensure the effective protection of premises in which class B fires may break out.

Keywords: sprinkler; activation; rate-of-rise heat detector; critical height; HIL spillage

For citation: Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Babikov I.A., Polyakov D.V. Calculated assessment of effectiveness of class B fire suppression using automatic fire sprinkler systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):88-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.88-98 (rus).

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

Введение

Спринклерные автоматические установки пожаротушения (АУП) нашли широкое применение в зданиях и помещениях различных групп¹ и классов функциональной пожарной опасности². Активация спринклерных АУП возможна путем вскрытия колб оросителей как от естественного нагрева восходящими высокотемпературными продуктами горения, так и принудительно — от дифференциальных тепловых пожарных извещателей (ДТПИ).

Процессам развития пожаров по пожарной нагрузке [1] в помещениях посвящено много работ отечественных и зарубежных исследователей [2–13]. Также имеется большое количество публикаций в области АУП, касающихся особенностей их действия [14–37] и эффективности применения [38–42].

В частности, в работе [38] были рассмотрены особенности расчетной оценки эффективности применения спринклерных АУП при тушении пожара класса А в зависимости от высоты установки спринклеров в защищаемом помещении и вида пожарной нагрузки с учетом места возникновения очага пожара и вероятности отказа ближайшего к нему оросителя. Эти расчеты были положены в основу приложения В Методики оценки возмож-

ности использования спринклерной АУП к СП 485.1311500.2020³.

Тем не менее представляется целесообразным рассмотреть особенность срабатывания спринклерной АУП при пожаре класса В с активацией от вскрытия колбы оросителя как от естественного нагрева, так и принудительно — от ДТПИ. При этом следует учитывать, что горение проливов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ) в виде достаточно тонкого слоя может быть потушено водой.

1. Модель пожара в помещении с АУП

Применительно к задаче оценки эффективности тушения очага пожара класса В спринклерной системой АУП целесообразно использовать модель [2–4, 38], согласно которой для приповерхностной области помещения, где расположены спринклеры, имеют место следующие выражения для скорости u_{Γ} и температуры T_{Γ} восходящих продуктов горения (рис. 1):

$$u_{\Gamma} = 0,96 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3} \min \left(1; 0,203 \left(\frac{H}{r} \right)^{5/6} \right); \quad (1)$$

$$T_{\Gamma} = T_0 + 16,9 \frac{Q^{2/3}}{H^{5/3}} \min \left(1; 0,318 \left(\frac{H}{r} \right)^{2/3} \right); \quad (2)$$

¹ СП 5.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с Изменением № 1) : (СП 5.13130.2009) : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 175.

² Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; утвержден Советом Федерации 11 июля 2008 г.

³ Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : (СП 485.1311500.2020) : утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 31 августа 2020 г. № 628.

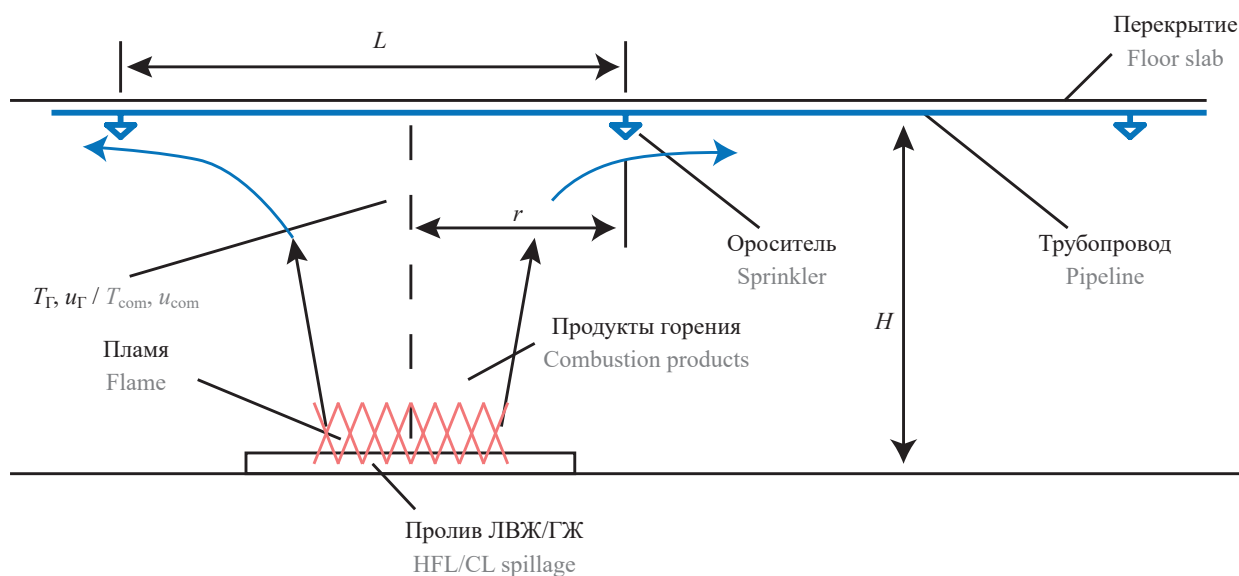


Рис. 1. Расчетная схема

Fig. 1. Design model

где H — высота расположения спринклеров над пожарной нагрузкой, может приниматься равной высоте помещения, м;

r — расстояние от оси конвективной колонки до ближайшего оросителя, м;

T_0 — начальная температура в помещении;

Q — тепловая мощность очага пожара, кВт.

Эмпирические выражения (1) и (2) предполагают, что перекрытие защищаемого помещения горизонтальное, влияние бокового воздушного потока на конвективную колонку незначительно, продукты горения свободно распространяются под перекрытием в горизонтальных направлениях и не накапливаются в припотолочном слое.

Величина Q , в свою очередь, является произведением удельной мощности тепловыделения q на площадь пожара $S_{\text{п}}$:

$$Q = S_{\text{п}} q. \quad (3)$$

Величина $S_{\text{п}}$ зависит от рельефа пола помещения и находящихся на нем предметов. Однако при допущении, что пол горизонтальный и не загроможден, а помещение достаточно просторное, величину $S_{\text{п}}$ можно оценить из выражения:

$$S_{\text{п}} \approx V/h_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где V — объем пролитой жидкости;

$h_{\text{пл}}$ — толщина пленки жидкости (согласно [43], 1...2 мм).

Применительно к проливам ЛВЖ и ГЖ скорость распространения пламени по зеркалу пролитой жидкости $u_{\text{п}}$ значительно выше, чем по поверхности твердых горючих материалов. В этой связи можно полагать, что тепловая мощность пожара почти скачкообразно достигает величины Q в те-

чение времени $t_{\text{п}}$, а потом остается постоянной. Из условия, что площадь пожара $S_{\text{п}}$ соответствует площади пролива ЛВЖ/ГЖ, величину $t_{\text{п}}$ можно оценить из выражения:

$$t_{\text{п}} = \frac{L}{u_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где L — расстояние от источника зажигания до наиболее удаленной части площади пролива ЛВЖ/ГЖ;

$u_{\text{п}}$ — скорость распространения пламени по зеркалу пролива.

Динамику площади пожара $S_{\text{п}}(t)$, если пролив ЛВЖ/ГЖ имеет форму круга с радиусом $R_{\text{ж}}$, целесообразно оценить для двух крайних случаев: когда очаг пожара в центре пролива и когда он на его границе. В первом случае

$$S_{\text{п}} = \pi(u_{\text{п}}t)^2, \quad t \in \left[0; \frac{R_{\text{ж}}}{u_{\text{п}}}\right], \quad L = R_{\text{ж}}. \quad (6)$$

Во втором случае (очаг пожара на границе кругового пролива) площадь пожара $S_{\text{п}}$ представляет собой площадь взаимопересечения окружностей радиусов $R_{\text{ж}}$ и $R_{\text{п}} = u_{\text{п}}t$, то исходя из геометрических соображений:

$$S_{\text{п}} = S_1 + S_2, \quad L = 2R_{\text{ж}}, \quad (7)$$

$$\text{где } S_1 = R_{\text{ж}}^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{2R_{\text{ж}}^2} \right) - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{2R_{\text{ж}}^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{4R_{\text{ж}}^2}} \right], \quad S_2 = \frac{R_{\text{п}}^2}{2} \left[\arccos \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ж}}} \sqrt{1 - \frac{R_{\text{п}}^2}{4R_{\text{ж}}^2}} \right].$$

Диапазон динамики площади пожара при круговом проливе ЛВЖ/ГЖ приведен на рис. 2 для случая $R_{\text{ж}} = 2,185$ м.

Если пролив ЛВЖ/ГЖ имеет форму прямоугольника со сторонами a и b ($a < b$), также целесообразно оценить динамику площади пожара $S_{\Pi}(t)$ для двух крайних случаев: когда очаг пожара находится

в центре прямоугольника и в углу. Когда очаг пожара в центре прямоугольника, исходя из геометрических соображений [5] (здесь $R_{\Pi} = u_{\Pi}t$ — текущее расстояние, пройденное фронтом пламени):

$$S_{\Pi} = \begin{cases} \pi R_{\Pi}^2 & \text{при } R_{\Pi} \in \left(0; \frac{a}{2}\right); \\ R_{\Pi}^2 \left(\pi - 2 \arccos \frac{a}{2R_{\Pi}} \right) + a \sqrt{R_{\Pi}^2 - 0,25a^2} & \text{при } R_{\Pi} \in [0,5a; 0,5b); \\ R_{\Pi}^2 \left(\pi - 2 \arccos \frac{a}{2R_{\Pi}} - 2 \arccos \frac{b}{2R_{\Pi}} \right) + a \sqrt{R_{\Pi}^2 - \frac{a^2}{4}} + b \sqrt{R_{\Pi}^2 - \frac{b^2}{4}} & \text{при } 2R_{\Pi} \in \left[b; \sqrt{a^2 + b^2}\right]; \end{cases} \quad (8)$$

Из (8) следует, что $S_{\Pi} = ab$ при $R_{\Pi} = L = 0,5\sqrt{a^2 + b^2}$.

Когда очаг пожара в углу прямоугольного пролива:

$$S_{\Pi} = \begin{cases} \frac{\pi}{4} R_{\Pi}^2 & \text{при } R_{\Pi} \in (0; a); \\ \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{a}{R_{\Pi}} \right) + \frac{a}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - a^2} & \text{при } R_{\Pi} \in [a; b); \\ \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{a}{R_{\Pi}} - \arccos \frac{b}{R_{\Pi}} \right) + \frac{a}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - a^2} + \frac{b}{2} \sqrt{R_{\Pi}^2 - b^2} & \text{при } R_{\Pi} \in \left[b; \sqrt{a^2 + b^2}\right]; \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) следует, что $S_{\Pi} = ab$ при $R_{\Pi} = L = \sqrt{a^2 + b^2}$.

Диапазон динамики площади пожара при прямоугольном проливе ЛВЖ/ГЖ приведен на рис. 3 для случая $a = 3$ м, $b = 5$ м.

При других формах площади пролива и местах очагов возгорания динамика $S_{\Pi}(t)$ и расстояния L также может быть определена с использованием геометрических соотношений и численных методов [44], но это выходит за рамки данной статьи.

Учитывая также, что вертикальная проекция оси извещателя попадает на площадь пожара и $r < 0,148H$ (см. рис. 1), выражения (1) и (2) могут быть представлены в упрощенном виде:

$$u_{\Gamma} = 0,96 \left(\frac{Q}{H} \right)^{1/3}; \quad (10)$$

$$T_{\Gamma} = T_0 + 16,9 \frac{Q^{2/3}}{H^{5/3}}. \quad (11)$$

2. Активация спринклера от теплового разрушения колбы восходящим конвективным потоком

Если активация спринклера происходит при разрушении его колбы от естественного нагрева восходящим конвективным потоком продуктов горения до паспортной температуры срабатывания T_a , то условие активации спринклерной АУП обуславливается неравенством:

$$T \geq T_a, \quad (12)$$

где T — текущая температура колбы.

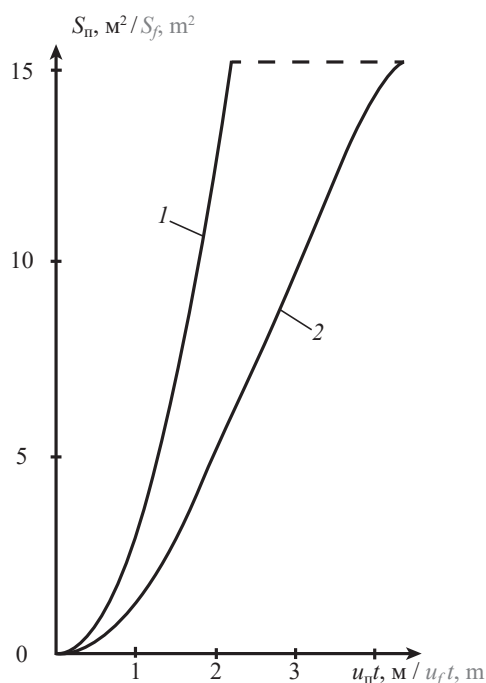


Рис. 2. Диапазон динамики площади пожара при проливе ЛВЖ/ГЖ в форме круга диаметром 4,37 м: 1 — очаг в центре пролива; 2 — очаг у края пролива

Fig. 2. The range of dynamic patterns of fire areas in the case of a circular HIL spillage with a 4.37 m diameter: 1 — the fire seat is in the centre; 2 — the fire seat is at the edge of the spillage

Согласно [14, 15], температура колбы спринклера T , определяющая его срабатывание, может быть описана уравнением теплового баланса:

$$K \frac{dT}{dt} = -\sqrt{u_r} (T - T_r) - C(T - T_r), \quad (13)$$

где C — коэффициент теплоотдачи от колбы к корпусу оросителя (коэффициент потерь тепла), $(\text{м/с})^{1/2}$;

T_c — температура корпуса оросителя, $^{\circ}\text{C}$;

K — коэффициент тепловой инерционности колбы, $(\text{с}\cdot\text{м})^{0.5}$.

Полагая, что температура корпуса T_c оросителя незначительно отличается от температуры колбы T и $(u_r, T_r) \approx \text{const}$, можно пренебречь вторым слагаемым в обыкновенном дифференциальном уравнении 1-го порядка (2.2) и с учетом [45] при начальном

условии $T(t=0) = T_0$ получить его решение в явном виде:

$$t_a = \frac{K}{\sqrt{u_r}} \ln \frac{T_r - T_0}{T_r - T_a}, \quad (14)$$

где t_a — время нагрева колбы спринклера, когда ее температура T достигнет паспортной величины T_a .

В таблице приведены значения условного времени $t_a K^{-1}$ в зависимости от высоты помещения H и тепловой мощности очага пожара Q , принимая во внимание (10) и (11).

С учетом (11) выражение (14) справедливо при условии:

$$Q > 0,0144 H^{2.5} (T_a - T_0)^{1.5}. \quad (15)$$

Таким образом, общее время активации АУП от теплового разрушения колбы можно оценить из выражения:

$$t_k = t_n + t_a, \quad (16)$$

Условное время срабатывания спринклера $t_a K^{-1} (\text{с/м})^{0.5}$ в зависимости от высоты помещения H и тепловой мощности очага пожара Q

Conditioned sprinkler response time $t_a K^{-1} (\text{с/м})^{0.5}$ depending on floor-to-ceiling height H and thermal capacity of fire seat Q

$H, \text{ м} / \text{ m}$	$Q, \text{ кВт} / \text{ kW}$						
	1000	2000	3000	5000	10 000	20 000	30 000
20	—	—	—	—	0,5043	0,2070	0,1352
19	—	—	—	—	0,4205	0,1825	0,1205
18	—	—	—	—	0,3543	0,1605	0,1070
17	—	—	—	0,9521	0,3002	0,1407	0,0946
16	—	—	—	0,6770	0,2548	0,1228	0,0832
15	—	—	—	0,5199	0,2161	0,1067	0,0728
14	—	—	1,0827	0,4114	0,1828	0,0921	0,0632
13	—	—	0,7017	0,3299	0,1539	0,0789	0,0544
12	—	1,2085	0,5114	0,2657	0,1287	0,0669	0,0464
11	—	0,7149	0,3868	0,2137	0,1066	0,0561	0,0391
10	—	0,4971	0,2963	0,1707	0,0872	0,0464	0,0325
9	1,1855	0,3604	0,2269	0,1348	0,0702	0,0378	0,0265
8	0,6465	0,2637	0,1721	0,1046	0,0554	0,0301	0,0212
7	0,4161	0,1913	0,1281	0,0793	0,0426	0,0233	0,0164
6	0,2753	0,1357	0,0925	0,0582	0,0316	0,0174	0,0123
5	0,1792	0,0925	0,0639	0,0407	0,0223	0,0123	0,0087

где время t_n определяется по выражению (5), а время t_a — по (14).

Следует иметь в виду, что при большой площади горения S_n пролива ЛВЖ/ГЖ, превышающей площадь, защищаемую одним оросителем, могут активироваться сразу несколько оросителей, что позволит гарантированно потушить пожар. В то же время, если площадь пролива будет иметь сложную конфигурацию, для оценки эффективности срабатывания АУП целесообразно провести либо компьютерный эксперимент (например, с использованием полевой модели пожара [6, 46]), либо натурный.

3. Активация спринклерной АУП от ДТПИ

Поскольку после момента t_n , когда пожар охватит всю площадь пролива, и температура T_r , согласно (2), стабилизировалась, важным условием срабатывания ДТПИ будет неравенство:

$$t_n > t_{\text{ДТПИ}}, \quad (17)$$

где $t_{\text{ДТПИ}}$ — время, в течение которого скорость возрастания температуры T_r достигнет паспортного значения θ_n срабатывания ДТПИ.

При $t < t_n$ будет иметь место скорость роста температуры T_r , которая может быть определена дифференцированием выражения (11) с учетом (3):

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{k_0 q^{2/3}}{H^{5/3} S_n^{1/3}} \frac{dS_n}{dt}, \quad (18)$$

где $k_0 = 11,2667$.

Зная вид динамики площади пожара $S_n(t)$, из (18) может быть найдено время $t_{\text{ДТПИ}}$. Некоторая трудность может заключаться только в нахождении производной dS_n/dt .

Применительно к круговому проливу, когда $S_n = \pi(u_n t)^2$ (например, линия 1 на рис. 2), очаг в центре и $r < 0,148H$, выражение (18) принимает вид:

$$\frac{dT_r}{dt} = 48,335 \frac{(u_n^2 q)^{2/3}}{H^{5/3}} t^{1/3}. \quad (19)$$

Предположив, что скорость роста температуры dT_r/dt достигла паспортного значения θ_n срабатывания ДТПИ, из (19) можно определить время $t_{\text{ДТПИ}}$:

$$t_{\text{ДТПИ}} = 4,28 \cdot 10^{-4} \frac{H^5 \theta_n^3}{u_n^4 q^2}. \quad (20)$$

При других формах площади пролива и очагах начала возгорания сложность нахождения $t_{\text{ДТПИ}}$ увеличивается. Например, найти производную dS_n/dt в выражениях (7)–(9) уже намного сложнее, поэтому для нахождения $t_{\text{ДТПИ}}$ потребуются применение численных методов.

Учитывая инерционность, обусловливаемую временем t_n , общее время принудительного разрушения колбы и активации тем самым оросителя может быть найдено из выражения:

$$t_k = t_{\text{ДТПИ}} + t_a. \quad (21)$$

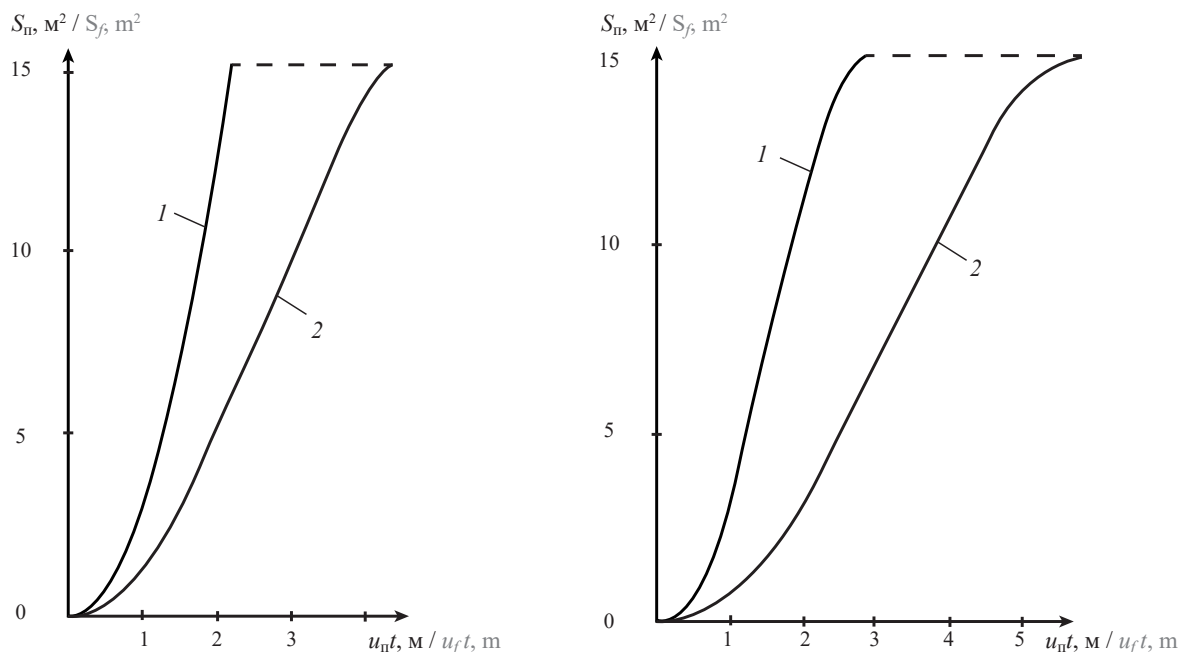


Рис. 3. Диапазон динамики площади пожара, когда пролив ЛВЖ/ГЖ имеет прямоугольную форму 3×5 м: 1 — очаг в центре пролива; 2 — очаг в углу пролива

Fig. 3. The range of dynamic patterns of fire areas in the case of a rectangular HIL spillage, having the dimensions of 3×5 m: 1 — the fire seat is in the centre; 2 — the fire seat is at the edge of the spillage

4. Примеры

4.0. В помещении высотой $H = 10$ м произошел пролив ЛВЖ ($q \approx 2000$ кВт/м², $u_{\text{п}} \approx 1$ м/с) на площади $S_{\text{п}} = 15$ м² в форме круга. В соответствии с (3) тепловая мощность пожара: $Q = 15 \cdot 2000 = 30\,000$ кВт. Учитывая, что источник зажигания находился в центре пролива, максимальное расстояние, пройденное пламенем по проливу ЛВЖ: $L = R_{\text{ж}} = \sqrt{S_{\text{п}}/\pi} = \sqrt{15/\pi} = 2,185$ м. По выражению (5) получаем время воспламенения всего пролива ЛВЖ: $t_{\text{п}} = 2,185/1 = 2,185$ с.

Требуется оценить время срабатывания спринклерной АУП при различных способах активации с учетом того, что $T_0 = 20$ °С, а центр пролива находится на расстоянии 1 м от вертикальной оси оросителя.

4.1. Спринклерная АУП в данном помещении активируется от термического разрушения колбы восходящими потоками продуктов горения при $T_a = 60$ °С, имеющей коэффициент тепловой инерционности $K = 120$ (с·м)^{0,5}.

Поскольку условие (4) выполняется: $30\,000 > 0,0144 \cdot 10^{2,5}(60 - 20)^{1,5} = 1152$ кВт, спринклерная АУП может активироваться от теплового разрушения колбы восходящими продуктами горения.

По выражениям (10) и (11) оценим скорость и температуру продуктов горения в припотолочном слое:

$$u_{\text{Г}} = 0,96 (30\,000/10)^{1/3} = 0,96 \cdot 14,42 = 13,85 \text{ м/с};$$

$$T_{\text{Г}} = 20 + 16,9 \cdot 30\,000^{2/3}/10^{5/3} = 371,5 \text{ °С}.$$

По выражению (14) получаем: $t_a = 120/\sqrt{13,85} \times \ln(371,5 - 20/371,5 - 60) = 3,895$ с. По выражению

(16) находим общее время активации АУП от теплового разрушения колбы: $t_{\text{к}} = 2,185 + 3,895 = 6,080$ с.

Таким образом, при пожаре пролива ЛВЖ в данном помещении спринклерная АУП с колбой активируется чуть больше чем за 6 с.

4.2. Спринклерная АУП активируется от срабатывания ДТПИ при паспортном значении $\theta_{\text{п}} = 5$ °С/мин = $0,08333$ °С/с и обладает инерционностью $t_{\text{и}} = 20$ с. Из выражений (20) и (21) получаем:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{ДТПИ}} + t_{\text{и}} = 4,28 \cdot 10^{-4} \frac{10^5 \cdot 0,0833^3}{1^4 \cdot 2000^2} + 20 = 6,19 \cdot 10^{-9} + 20 \approx 20 \text{ с}.$$

Таким образом, при пожаре пролива ЛВЖ в данном помещении спринклерная АУП также может активироваться от ДТПИ.

Выводы

Получены выражения для экспресс-оценки эффективности спринклерной АУП при пожаре класса В и активации АУП от термического разрушения колбы как от нагрева ее восходящими продуктами горения, так и принудительно — от срабатывания ДТПИ. Эти подходы могут быть использованы специалистами пожарной охраны и других профильных организаций, занимающихся вопросами защиты помещений и зданий от пожара при проливах ЛВЖ/ГЖ, а также при внесении соответствующих дополнений в нормативные документы, касающиеся АУП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожарная нагрузка. Справочник. СИТИС-СПН-1 : редакция 3. СИТИС, 2014. 51 с.
2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М. : Стройиздат, 1990. 434 с.
3. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 2-1–2-17.
4. Alpert R.L. Ceiling jet flows // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 2-18–2-31.
5. Иценко А.Д., Ключ В.В., Польшко С.В., Таранцев А.А. О построении уточненного совмещенного графика для расчета сил и средств для тушения пожара // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 82–92. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.82-92
6. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Бабинов И.А. Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 42–53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53
7. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
8. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Chichester : John Wiley and Sons, 1985. 424 p.
9. Heskestad G., Bill R.G.Jr. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects // Fire Safety Journal. 1988. Vol. 14. No. 1–2. Pp. 113–125. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90049-5
10. Fleming R.P. Automatic sprinkler system calculations // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA : NFPA, 2002. Pp. 4-72–4-87.

11. *Танклевский Л.Т., Бабинов 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
12. *Бабинов И.А., Танклевский Л.Т., 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.
13. *Tanklevskiy L., Kopylov S., 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. New York, 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
14. National Fire Protection Association. NFPA Handbook, 15th 1981 Edition.
15. *Tanklevskiy L., Vasilev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A.* A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // *Proceedings of the Thirteenth International Interflam Conference*. 24–26 June 2013 London, UK. London, 2013. Pp. 503–508.
16. *Tanklevskiy L., Kopylov S., 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, 14–16th March, 2012), SP Technical Research Institute of Sweden. 2012. Vol. 1. Pp. 87–92.
17. *Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Алешин В.В., Губин Р.Ю.* Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / под общ. ред. Н.П. Копылова. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
18. *Сафронов В.В., Аксенова Е.В.* Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации : учеб. пособие. Орел : ОрлГТУ, 2004. 57 с.
19. *Воронков О.Ю.* Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016.
20. *Илюшов Н.Я.* Автоматические установки пожаротушения : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
21. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 152 с.
22. *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*. Research Publishing Services, 2013. Pp. 482–491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
23. *Yao C.* Application of sprinkler technology. Presented at Workshop on Engineering Applications of Fire Technology. National Bureau of Standards. 1980.
24. *Xin Y., Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Xiangyang Zhou, D'Aniello S.* SMART Sprinkler Protection for Highly Challenging Fires — Part 1: System Design and Function Evaluation // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. No. 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
25. *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/Fire Safety*. 2015. № 1. С. 72–79.
26. *Bullen M.L.* The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling // *Fire Technology*. 1977. Vol. 13. No. 1. Pp. 21–34. DOI: 10.1007/bf02338883
27. *Груданова О.В., Таранцев А.А., Королева Л.А.* Об экономической оценке двух путей модернизации автоматических установок пожаротушения // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2007. № 1. С. 38–42.
28. *Бубырь Н.Ф., Воробьев Р.П., Быстров Ю.В., Зуйков Г.М.* Эксплуатация установок пожарной автоматики / под ред. Н.Ф. Бубыря. М. : Стройиздат, 1986. 367 с.
29. *Малинин В.Р., Коробейникова Е.Г.* Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности : учеб. пособие. СПб. : СПбУ МВД России, 2002. 82 с.
30. *Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З.* Численные методы анализа. 3-е изд., перераб. М. : Наука, 1967. 368 с.
31. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. 5-е изд., стереотипное. М. : Наука, 1976. 576 с.
32. *Хасанов И.Р., Карпов А.В., Лобова С.Ф., Петрова Н.В.* Полевое моделирование динамики пожара при ответе на вопрос о выполнении системой пожарной сигнализации своих функций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29 (5). С. 40–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50

34. Горбань Ю.И., Немчинов С.Г. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29 (5). С. 82–88.
35. Мешман Л.М. Частные вопросы при проектировании водяных АУП // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28 (1). С. 80–88.
36. Мешман Л.М. Влияние проектного значения интенсивности орошения диктующего оросителя на гидравлические параметры распределительной сети АУП // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28 (2). С. 93–97.

REFERENCES

1. Fire load. Handbook. SITIS-SPN-1 : revision 3. SITIS, 2014; 51. (rus).
2. Drysdale D. *Introduction to fire dynamics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990; 434. (rus).
3. Heskestad G. Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 2-1-2-17.
4. Alpert R.L. Ceiling Jet Flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 2-18-2-31.
5. Ishchenko A.D., Klyuy V.V., Polynko S.V., Tarantsev A.A. About building a revised combined graphics the calculation of forces and means to extinguish the fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):82-92. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.82-92 (rus).
6. Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Zybina O.A., Babikov I.A. The efficiency assessment of an automatic sprinkler system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):42-53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53 (rus).
7. Puzach S.V. *Calculation methods of heat and mass transfer in a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety : monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. (rus).
8. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985; 424.
9. Heskestad G., Bill R.G., Jr. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects. *Fire Safety Journal*. 1988; 14(1-2):113-125. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90049-5
10. Fleming R.P. Automatic sprinkler system calculations. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy MA, NFPA, 2002; 4-72-4-87.
11. Tanklevskiy L.T., Babikov I.A., Tarantsev A.A., Zybina O.A. On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises. *Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):33-43. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.33-43 (rus).
12. Babikov I.A., Tanklevskiy A.L., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Problems of risk management in the technosphere*. 2019; 3(51):34-41. (rus).
13. Tanklevskiy L., Kopylov S., 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*. New York, 2012; 1:87-92.
14. *National fire protection association. NFPA Handbook*, 15th 1981 Edition.
15. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation. *Proceedings of the Thirteenth International Interflam Conference. 24–26 June 2013 London, UK*. London, 2013; 503-508.
16. Tanklevskiy L., Kopylov S., 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, 14-16th March, 2012)*. SP Technical Research Institute of Sweden, 2012; 1:87-92.
17. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Y. *Design of water and foam automatic fire extinguishing systems*; N.P. Kopylov (ed.). VNIPO, 2002; 413. (rus).
18. Safronov V.V., Aksenova E.V. *Selection and calculation of parameters of fire extinguishing and alarm systems : textbook*. Orel, Orel State Technical University, 2004. (rus).
19. Voronkov O.Y. *Calculation, installation and operation of automatic fire-extinguishing installations : textbook*. Omsk, Publishing house OmSTU, 2016. (rus).
20. Ilyushov N.Ya. *Automatic fire extinguishing installations : textbook*. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2016; 134. (rus).
21. Khrapsky S.F., Starikov V.I., Ryssev D.V. *Industrial and fire automation: textbook*. Omsk, Publishing house of OmSTU, 2013; 152. (rus).

23. 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*. Research Publishing Services, 2013; 482-491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_07-05
24. Yao C. Application of sprinkler technology. *Presented at Workshop on Engineering Applications of Fire Technology*. National Bureau of Standards. 1980.
25. Xin Y., Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Xiangyang Zhou, D'Aniello S. SMART Sprinkler Protection for Highly Challenging Fires — Part 1: System Design and Function Evaluation // *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. No. 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
26. Tarantsev A.A., Tanklevsky L.T., Snegirev A.Y., Tsoy A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2015; 1:72-79. (rus).
27. Bullen M.L. The effect of a sprinkler on the stability of a smoke layer beneath a ceiling. *Fire Technology*. 1977; 13(1):21-34. DOI: 10.1007/bf02338883
28. Grudanova O.V., Tarantsev A.A., Koroleva L.A. On economic evaluation of two ways of modernization of automatic fire extinguishing installations. *Problems of risk management in the technosphere*. 2007; 1:38-42. (rus).
29. Bubyр N.F., Vorobyev R.P., Bystrov Y.V., Zuikov G.M. *Operation of the fire-fighting automatic installations*; Bubyр N.F. (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1986; 367. (rus).
30. Malinin V.R., Korobeinikova E.G. *Categorization of premises and buildings according to explosion and fire hazard : textbook*. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2002; 82. (rus).
31. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Numerical methods of analysis*. 3rd ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1967; 368. (rus).
32. Kamke E. *Handbook of ordinary differential equations*. 5th ed., stereotyped. Moscow, Nauka Publ., 1976; 576. (rus).
33. Khasanov I.R., Karpov A.V., Lobova S.F., Petrova N.V. Field modeling of the fire dynamics as an answer to the question about the fire alarm performance. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):40-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.40-50 (rus).
34. Gorban Yu.I., Nemchinov S.G. Fire-fighting robots are in the fire automation: science and technology studies, the behavior of algorithms and design. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):82-88. (rus).
35. Meshman L.M. Special issues on design water AFEI. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):80-88. (rus).
36. Meshman L.M. Effect of irrigation intensity design value dictating the sprinkler on the hydraulic parameters of the distribution network AFES. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(2):93-97. (rus).

Поступила 02.02.2021, после доработки 19.02.2021; принята к публикации 04.03.2021
 Received February 02, 2021; Received in revised form February 19, 2021;
 Accepted March 4, 2021

Информация об авторах

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.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; Chief of Research Officer, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; профессор, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

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

ПОЛЯКОВ Дмитрий Витальевич, заместитель начальника кафедры, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 769985; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: gost-r01@yandex.ru

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; Professor, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.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; ID RISC: 949758; Scopus Author ID: 57205082476; ResearcherID: S-5502-2017; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

Dmitriy V. POLIAKOV, Deputy Head of Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 769985; ORCID: 0000-0001-8592-3047; e-mail: gost-r01@yandex.ru